



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD INGENIERIA
CARRERA DE TELECOMUNICACIONES

Simulación del aerogenerador tornillo de Arquímedes en aplicaciones de baja tensión para optimizar el rendimiento energético.

Trabajo de Titulación para optar al título de Ingeniero en Telecomunicaciones.

Autor:

Romero Sanchez, Erik Fernando

Tutor:

Msc. José Luis Jinez Tapia.

Riobamba, Ecuador. 2026

DECLARATORIA DE AUTORÍA

Yo, Erik Fernando Romero Sanchez, con cédula de ciudadanía 0603944190, autor del trabajo de investigación titulado: Simulación del aerogenerador tornillo de Arquímedes en aplicaciones de baja tensión para optimizar el rendimiento energético, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mi exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedo a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto de los derechos de autor de la obra referida será de mi entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, 20 de marzo del 2026.



Erik Fernando Romero Sanchez

C.I: 0603944190

DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR

Quien suscribe, **José Luis Jinez Tapia** catedrático adscrito a la Facultad de Ingeniería, por medio del presente documento certifico haber asesorado y revisado el desarrollo del trabajo de investigación titulado: **“Simulación del aerogenerador tornillo de Arquímedes en aplicaciones de baja tensión para optimizar el rendimiento energético”**, bajo la autoría de **Erik Fernando Romero Sanchez**; por lo que se autoriza ejecutar los trámites legales para su sustentación.

Es todo cuanto informar en honor a la verdad; en Riobamba, a los 20 días del mes de febrero de 2026



Msc. José Luis Jinez Tapia, Mgs
C.I: 0602899007

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación **“Simulación del aerogenerador tornillo de Arquímedes en aplicaciones de baja tensión para optimizar el rendimiento energético”**, presentado por **Romero Sanchez Erik Fernando**, con cédula de identidad número **0603944190**, bajo la tutoría de Msc. José Jinez Tapia; certificamos que recomendamos la **APROBACIÓN** de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba 20 de marzo de 2016.

Ph.D. Manuel Antonio Meneses Freire

PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO



Mgs. Deysi Vilma Inca Balseca

MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



PhD. Daniel Haro Mendoza

MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO

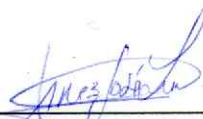




CERTIFICACIÓN

Que, **Erik Fernando Romero Sanchez** con CC: **0603944190**, estudiante de la Carrera **TELECOMUNICACIONES**, Facultad de **INGENIERÍA**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado **"Simulación del aerogenerador tornillo de Arquímedes en aplicaciones de baja tensión para optimizar el rendimiento energético."**, cumple con el 7%, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **COMPILATIO**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente, autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 18 de febrero de 2026



Msc. José Jinez Tapia
TUTOR

DEDICATORIA

A dios, que siempre estuvo conmigo en las buenas y en las malas, que me brindo la fuerza para seguir adelante y nunca me abandono.

A mis padres, que fueron el pilar, la sabiduría y compañía en toda mi vida, que me brindaron la paciencia y la fuerza necesaria para seguir adelante.

A mi hermano mayor, que siempre me ayudada cuando más lo necesitaba, que es confidente fiel, me ha brindado el apoyo condicional y el saber que va a estar ahí cuando más lo necesite.

A mis profesores y tutor, que siempre estuvieron ahí para guiarme y mostrarme su apoyo para poder culminar mis estudios.

Dedico este logro a todos ellos por siempre estar ahí presente y ayudarme cuando más lo necesitaba.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por siempre estar a mi lado, darme la sabiduría y fuerza, que necesité en todo el camino, con su guía pude seguir adelante y poder culminar esta maravillosa etapa.

Agradezco a mis padres por estar a mi lado, estar ahí cuando más los necesitaba en un concejo, una reflexión y una hablada que me ayudaron cuando más lo necesitaba, a mi madre, que me acompaña con su presencia en los momentos más difíciles y siempre tenía palabras de aliento para seguir adelante. A la memoria de mis abuelitos, que me inspiraban y estaban presente en cada paso que daba. Mi hermano, que esta cuando más lo necesito y siempre va a estar. A Gaby, que me ha motivado cuando más lo necesitaba y el amor que me ha brindado para seguir adelante.

A mi tutor, José Jinez, que me brindo de su apoyo, orientación y paciencia para poder seguir, su guía y dedicación en el desarrollo y culminación de este proyecto. A mis profesores que compartieron sus conocimientos y me ayudaron en todo mi proceso académico.

A mis compañeros y amigos con sus palabras de aliento estuvieron presentes y brindaron su apoyo en todos estos años.

ÍNDICE GENERAL

DECLARATORIA DE AUTORÍA

DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

CERTIFICADO ANTIPLAGIO

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS

RESUMEN

ABSTRACT

CAPÍTULO I. INTRODUCCION..... 16

1.1 Planteamiento del Problema..... 17

1.2 Justificación..... 18

1.3 Objetivos 19

1.3.1 General 19

1.3.2 Específicos 19

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO..... 21

2.1 Estado del arte 21

2.2 Marco teórico 24

2.2.1 Aerogeneradores..... 24

2.2.2 Funciones del aerogenerador 25

2.2.3 Aerogenerador Tipo Tornillo de Arquímedes 27

2.2.4 Túnel de viento 28

2.2.5 Velocidad de flujo en su interior 29

2.2.6 Dirección del Flujo 31

2.3 Aerogeneradores eólicos de baja tensión 32

2.4 Energía	32
2.4.1 Clasificación de energía	33
2.4.2 Energía cinética a energía eólica	33
2.4.3 Energía eléctrica.....	34
2.5 Tornillo de Arquímedes y la energía.....	34
CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO	36
3.1 Enfoque de investigación	36
3.2 Diseño de investigación	36
3.3 Métodos de Investigación.....	36
3.4 Tipo de investigación	37
3.5 Técnicas de recolección de datos	37
3.6 Población y muestra	37
3.7 Métodos de análisis	38
3.8 Procesamiento de datos	38
3.9 Operación de las variables.....	40
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	41
CAPITULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	90
5.1 Conclusiones	90
5.2 Recomendaciones.....	91
BIBLIOGRAFÍA.....	92
ANEXOS	95

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Partes de aerogenerador	25
Figura 2. Aerogenerador de eje horizontal.....	26
0Figura 3. Aerogenerador de eje vertical	27
Figura 4. Análisis de la fuerza aerodinámica del rotor ASWT	27
Figura 5. Túnel subsónico	30
Figura 6. Túnel transónico	30
Figura 7. Túnel de viento supersónico	31
Figura 8. Túnel de viento hipersónico.....	31
Figura 9. Túnel de viento vertical	32
Figura 10. Túnel de viento horizontal	32
Figura 11. Diseño del túnel de viento abierto.	46
Figura 12. Contractor.	46
Figura 13. Zona de Pruebas diseñado.	47
Figura 14. Difusor diseñado.	47
Figura 15. Panel enderezador de flujo.....	48
Figura 16. Configuración de mallado manual.....	49
Figura 17. Rendimiento del mallado.	50
Figura 18. Display del refinamiento mallado.....	50
Figura 19. Vista superior del mallado	51
Figura 20. Vista lateral del mallado	51
Figura 21. Análisis de los fluidos.....	52
Figura 22. Selección de fluidos	53
Figura 23. Rugosidad de las paredes.....	53
Figura 24. Condiciones iniciales	54

Figura 25. Vista delantera del túnel	55
Figura 26. Condiciones de límite o de borde de entrada.	55
Figura 27. Condiciones de límite o de borde de salida.	55
Figura 28. Condiciones de contorno o de borde del túnel de viento.	56
Figura 29. Puntos globales a estudiar.	56
Figura 30. Ventana de ejecución.	57
Figura 31. Presión de entrada.	58
Figura 32. Velocidad.	58
Figura 33. Temperatura máxima.	58
Figura 34. Humedad.	59
Figura 35. Ventana Surface Plot.	60
Figura 36. Mapeado de la presión dentro del túnel de viento.	60
Figura 37. Mapeada temperatura dentro del túnel de viento.	61
Figura 38. Mapeada humedad dentro del túnel de viento.	61
Figura 39. Simulación de la velocidad del viento.	62
Figura 40. Mapa de vectores de la velocidad.	62
Figura 41. Número de Mach.	63
Figura 42. Perfil de Temperatura	63
Figura 43. Perfil de presión.	64
Figura 44. Perfil de la humedad relativa.	64
Figura 45. Perfil de velocidad.	65
Figura 46. Número de Mach	66
Figura 47. Vista del rotor tipo tornillo de Arquímedes hecho en SolidWorks.	66
Figura 48. Aerogenerador tornillo de Arquímedes con su base.	67
Figura 49. Vista del aerogenerador Tornillo de Arquímedes dentro del túnel de viento.	67
Figura 50. Ventana de Tipo de análisis.	68

Figura 51. Colocación de la rotación en el aerogenerador.....	69
Figura 52. Vista de donde se coloca la rotación.....	69
Figura 53. Colocación de la medición del Torque en el aerogenerador.....	70
Figura 54. Vista de las aspas seleccionadas del aerogenerador.	70
Figura 55. Mallado global del túnel de viento.	71
Figura 56. Vista del mallado global del túnel de viento.	71
Figura 57. Mallado local del aerogenerador.	72
Figura 58. Vista del mallado local del aerogenerador.....	72
Figura 59. Ventana de las variables de entrada.....	73
Figura 60. Ventana de variables de salida.....	73
Figura 61. Simulación de la trayectoria del viento.	74
Figura 62. Mallado en el aerogenerador.	74
Figura 63. Distribución del flujo en el aerogenerador.	75
Figura 64. Presión en el aerogenerador.....	75
Figura 65. Histograma de la potencia	79
Figura 66. Dispersión Matricial Velocidad - Torque - Potencia.....	80
Figura 67. Tabla de correlación.	80
Figura 68. Grafica de Dispersión.	83
Figura 69. Grafica Q-Q de Residuos.....	83
Figura 70. Grafica de residuos estandarizados vs valores predichos estandarizados.	84
Figura 71. Residual vs Leverage.....	85
Figura 72. Diagrama de Cajas de la Potencia - Velocidades Agrupadas.	87

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de túnel de viento	28
Tabla 2. Variable dependiente.....	40
Tabla 3. Variable independiente.....	40
Tabla 4. Ventilador Helicoidal tubular.....	45
Tabla 5. Torque	77
Tabla 6. Datos obtenidos del torque.....	78
Tabla 7. Datos obtenidos del torque.....	79
Tabla 8. Parámetros obtenidos del modelo regresión lineal.....	81
Tabla 9. Parámetros obtenidos del modelo regresión lineal cuadrática	82
Tabla 10. Test de normalidad de Shapiro-wilk	85
Tabla 11. Test de normalidad de Shapiro-wilk	86
Tabla 12. Test de Breusch-pagan	86
Tabla 13. Test de durbin-watson	87
Tabla 14. Anova con temperatura	88
Tabla 15. Anova sin temperatura	89

RESUMEN

En el presente estudio desarrolla la simulación computacional de un aerogenerador tipo tornillo de Arquímedes de baja potencia, donde el objetivo principal será analizar el rendimiento energético bajo condiciones controladas dentro de un túnel de viento, el cual permite estudiar la integración entre el flujo del viento y la geometría propuesta del aerogenerador. El diseño que se seleccionó para el aerogenerador fue de tres aspas con un ángulo de separación uniforme, con esto se obtuvo una estabilidad estructural y una capacidad de aprovechar el flujo de viento de una manera gradual. Con la simulación CFD se evalúa la forma y dimensiones del tornillo de Arquímedes influyendo directamente en la generación de torque, después se calcula la potencia producida, evidenciando en los resultados que la geometría adoptada permite la transferencia de energía eficiente entre el flujo incidente y el sistema rotatorio.

El tipo de metodología aplicada será tipo mixta como recolección de datos y el procesamiento de los datos obtenidos. Con las variables de entrada y salida que se obtuvieron de la simulación se obtuvo la velocidad del flujo, la temperatura, torque generado y la potencia, se realizó un análisis estadístico, aplicando pruebas de normalidad donde se verifica la distribución de las variables, también análisis de varianza para identificar si existe diferencia significativa en el comportamiento de torque y potencia, con distintas condiciones de operación, también mediante modelos regresión para la relación funcional entre las variables, donde el ajuste cuadrático representa de mejor manera el comportamiento, esta combinación entre el análisis y la simulación CFD permite cuantificar el rendimiento energético del aerogenerador y validar la consistencia y confiabilidad de los resultados y el diseño propuesto del aerogenerador de baja potencia.

Palabras Claves: aerogenerador, Arquímedes, túnel, viento, torque, potencia, tornillo, helicoidal.

ABSTRACT

In this study, a computational simulation of a low-power Archimedes screw wind turbine is developed, with the main objective of analysing its energy performance under controlled conditions in a wind tunnel, enabling the study of the integration between the wind flow and the proposed wind turbine geometry. The design selected for the wind turbine was a three-bladed configuration with a uniform separation angle, which provided structural stability and the ability to harness wind flow gradually. The CFD simulation evaluates the shape and dimensions of the Archimedes screw, directly influencing torque generation. The power produced is then calculated, showing that the adopted geometry enables efficient energy transfer between the incident flow and the rotating system. The methodology applied will be mixed, including data collection and data processing. Using the input and output variables obtained from the simulation, the flow velocity, temperature, generated torque, and power were calculated, a statistical analysis was performed, applying normality tests to verify the distribution of the variables, as well as analysis of variance to identify if there is a significant difference in the behaviour of torque and power, with different operating conditions, also through regression models for the functional relationship between the variables, where the quadratic fit best represents the behaviour, this combination of analysis and CFD simulation allows quantifying the energy performance of the wind turbine and validating the consistency and reliability of the results and the proposed design of the low-power wind turbine.

Keywords: wind turbine, Archimedes, tunnel, wind, torque, power, screw, helical



Reviewed by:
Mgs. Hugo Romero
ENGLISH PROFESSOR
C.C. 0603156258

CAPÍTULO I. INTRODUCCION.

En los últimos años, el interés por los sistemas de generación eólica ha crecido a gran escala, especialmente en espacios urbanos y zonas con recursos energéticos limitados, donde la energía renovable se presenta como una alternativa viable y accesible. Dentro de estos sistemas, los aerogeneradores de eje vertical han adquirido relevancia debido a su fácil construcción, la capacidad de operar con velocidades de viento bajas y su adecuado desempeño en flujos turbulentos o no uniformes. Entre estas configuraciones, el aerogenerador tipo tornillo de Arquímedes ha surgido como una propuesta innovadora gracias a su geometría helicoidal, permitiendo aprovechar mejor el viento en direcciones cambiantes y reduciendo los niveles de ruido y vibraciones, que es útil para aplicaciones residenciales o educativas de baja tensión [1].

A pesar de las ventajas que ofrece el aerogenerador tipo tornillo de Arquímedes, existe una notable falta de estudios que analicen con profundidad su desempeño en condiciones de baja velocidad de viento. En Ecuador y en gran parte de Latinoamérica, las investigaciones se orientan más hacia turbinas de eje vertical tradicionales, como Savonius y Darrieus, mientras que los modelos helicoidales han recibido poca atención académica, ante esto, se vuelve indispensable realizar simulaciones detalladas que permitan estudiar el funcionamiento de este aerogenerador de manera controlada y precisa [2].

En este escenario, la simulación mediante Dinámica de Fluidos Computacionales (CFD), se presenta como una herramienta principal para predecir el rendimiento energético y el comportamiento aerodinámico del aerogenerador. Las simulaciones permiten obtener parámetros como distribución del flujo, coeficiente de torque, zonas de separación y eficiencia aerodinámica, reduciendo costos de construcción y acelera los procesos de optimización [3].

Adicionalmente, la simulación del túnel de viento establece un recurso esencial para recrear condiciones controladas de operación y validar numéricamente el desempeño del aerogenerador. Estudios recientes destacan de gran valor estas herramientas para fines pedagógicos y de investigación, permitiendo replicar perfiles de velocidad, condiciones de contorno y patrones de turbulencias de aspecto confiable [4].

Se espera que los resultados finales sean una caracterización del rendimiento del aerogenerador tornillo de Arquímedes, reconociendo sus ventajas y desventajas en sus geometría y efectos del flujo turbulento. También, se espera que el túnel de viento simulado ofrezca una herramienta

confiable para en un futuro imitar condiciones reales. El estudio ayudara al sector académico, fomentar el desarrollo de avances en alternativas renovables [5]

1.1 Planteamiento del Problema

A nivel mundial, el incremento en el consumo energético y la continua dependencia de combustibles fósiles han intensificado los impactos ambientales, como la emisión de gases de efecto invernadero. Estos efectos no solo afectan los ecosistemas naturales, también comprometen la salud y el bienestar humano tanto en la actualidad como futuras generaciones. La energía eólica, ha demostrado ser una alternativa más eficiente y escalable, donde requiere soluciones accesibles y de bajo costo. Sin embargo, el uso de turbinas eólicas convencionales presenta limitaciones cuando se opera en zonas con velocidades de viento reducida o con alta turbulencia.

En Latinoamérica, el interés por soluciones de energía eólica de pequeña escala ha crecido en los últimos años, impulsando por la necesidad de abastecer zonas rurales aisladas, promoviendo tecnologías accesibles. No obstante, la región presenta limitaciones en cuanto a infraestructuras, investigaciones y dispositivos eficientes para trabajar con velocidades de viento bajas, en entornos urbanos y rurales. En estudios recientes, se ha centrado en aerogeneradores de eje vertical convencionales, como Savonius y Darrieus, mientras que modelos helicoidales, como el tornillo de Arquímedes, reciben poca atención a pesar de su gran potencial para operar de manera eficiente en flujos turbulentos y multidireccionales.

En Ecuador, el interés por los sistemas de generación eólica de pequeña escala ha aumentado gracias al impulso de proyectos comunitarios, iniciativas educativas y en zonas rurales con limitado acceso a energía eléctrica estable, pero, la mayoría de estudios nacionales se concentran en el diseño o prototipos de turbinas convencionales, existiendo poco estudio en aerogeneradores helicoidales, especialmente, sobre su análisis mediante simulaciones aerodinámicas mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) y el uso de túnel de viento, ya sea reales o simulados.

El problema afecta a quienes buscan la implementación de sistemas eólicos de baja potencia ya sea en zonas urbanas o rurales del país, ya que no se dispone de información suficiente que permita predecir el rendimiento energético del aerogenerador tipo tornillo de Arquímedes ni optimizar su geometría para velocidades de viento bajas. Una de las causas es la falta de estudios experimentales, otra el costo a un prototipo físico y la escasa aplicación de herramientas CFD en análisis de turbinas helicoidales. Por ello, la acogida de soluciones renovables de pequeña

escala se ve restringida, donde el desarrollo de proyectos pedagógicos o comunitarios está limitado.

Como resultado, el uso de la energía eólica de baja potencia es escaso y pierde el potencial que un dispositivo se ajuste eficientemente a distintas condiciones de viento. La falta de conocimiento técnico no permite el desarrollo de prototipos, reduciendo la disposición de poder optimizar, obstaculizando el aprendizaje de estudios en áreas relacionadas con energías renovables.

En vista de lo anterior, el presente estudio se plantea una investigación que donde se pueda analizar, con ayuda de simulaciones, el comportamiento del aerogenerador tipo tornillo de Arquímedes dentro de un túnel de viento virtual, para poder identificar parámetros críticos, evaluar y corregir el diseño geométricas, orientado a optimizar el rendimiento energético. Por ello, se propone que el estudio ofrezca información que sea de confiable y asequible, para futuros prototipos o diseños con relación en energías renovables en el Ecuador.

1.2 Justificación

El cambio hacia fuentes de energías renovables se ha convertido en una prioridad global ante el incremento de los impactos ambientales derivados del uso de combustibles fósiles, unos ejemplos es el calentamiento global, la contaminación atmosférica y la pérdida de recursos naturales. En ese sentido, las tecnologías eólicas de baja potencia han adquirido especial importancia debido a su capacidad para operar en entornos urbanos y rurales con velocidades de viento reducidas, que lo convierte en una de las alternativas más viables como cubrir la demanda energética de una manera sostenible. El análisis y optimización de aerogeneradores tipo tornillo de Arquímedes, resulta particularmente actual debido a su potencial para mejorar el aprovechamiento del viento en condiciones de baja turbulencia y un escaso estudio en la región.

Los beneficiarios de este estudio serán instituciones educativas, laboratorios universitarios, comunidades rurales que no tengan acceso estable a red eléctrica y proyectos que quieran soluciones energéticas económicas y sostenibles. En Ecuador, existen pocos dispositivos eólicos optimizados para baja velocidad, limitando la capacidad de desarrollar proyectos de impacto social y académico, destacando la importancia de generar conocimiento confiable sobre esta tecnología.

Existe un crecimiento en los estudios sobre aerogeneradores Savonius y Darrieus en Ecuador y Latinoamérica, pero referente al comportamiento aerodinámico del aerogenerador tipo tornillo de Arquímedes, existe muy poco, especialmente en escenarios de baja tensión y bajo número de Reynolds [5]. El estudio propuesto aporta información científica, permitiendo caracterizar este tipo de aerogenerador mediante simulaciones CFD y proporcionando bases teóricas para futuras investigaciones y desarrollo de estas. Este estudio contribuirá a llenar una brecha académica existente en torno a modelos helicoidales y su eficiencia energética.

Hablando de un enfoque aplicado, el proyecto permitirá evaluar y optimizar el rendimiento energético del aerogenerador analizando sin necesidad de construir prototipos costosos, reduciendo tiempos y recursos necesarios para el desarrollo experimental. La simulación CFD combinada el túnel de viento virtual, ofrecerá datos precisos sobre distribución del flujo, coeficiente aerodinámico y zonas de pérdida energética [4]. Los resultados podrán emplearse directamente para mejoras en un futuro, implementar sistemas reales en laboratorios universitarios. Como resultado, la investigación contribuye simultáneamente a la prevención de fallas, la optimización de recursos y fortalecer la capacidad local en energías renovables.

El estudio, esta enfoca un tema no muy explorado en el Ecuador, la simulación aerodinámica de un aerogenerador helicoidal mediante herramientas CFD, acompañada de un análisis virtual de túnel de viento. Si existen estudios sobre túneles de viento didácticos o aerogeneradores convencionales, pero pocos han aplicado esta combinación metodológica al tornillo de Arquímedes [3]. El presente estudio abarca un método riguroso y accesible para la evaluación de aerogeneradores no convencionales, lo que aporta un presente metodológico para futuras investigaciones y proyectos académicos.

1.3 Objetivos

1.3.1 General

Simular el aerogenerador tornillo de Arquímedes en aplicaciones de baja tensión para optimizar el rendimiento energético.

1.3.2 Específicos

- Analizar los modelos aerodinámicos y electromecánicos del aerogenerador tornillo de Arquímedes, considerando sus parámetros geométricos y coeficiente de potencia.
- Simular el aerogenerador tornillo de Arquímedes y túnel de viento, considerando sus parámetros geométricos y coeficiente de potencia.

- Analizar el diseño geométrico del aerogenerador tornillo de Arquímedes mediante técnicas de simulación computacional CFD, para poder maximizar su coeficiente de potencia y su eficiencia energética.
- Evaluar el rendimiento del aerogenerador tornillo de Arquímedes mediante el análisis de los datos de torque y potencia obtenidas mediante la simulación CFD.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.

2.1 Estado del arte

Los túneles de viento son herramientas fundamentales para el estudio de fenómenos aerodinámicos, con múltiples aplicaciones en ingeniería y ciencia, combinando rotación y traslación, usado por ejemplo para el movimiento del agua o moliendo materia prima, gracias a la forma espiral que circula en el propio eje asemejándose a un tornillo formando una línea helicoidal.

Se puede usar como un dispositivo experimental porque está compuesta por tres palas circulares que se enrollan entre sí y luego se expanden para simular el flujo de aire alrededor de objetos estacionarios o estáticos que facilita el tornillo de Arquímedes, el mismo que se usará para el desarrollo de la investigación y así demostrar el uso de esta herramienta para optimizar el rendimiento energético expulsando el aire [6].

Cuenta con un conducto tubular similar a las conchas alargadas que se encuentran en la playa, forzando el paso de aire o gas alrededor del tubo garantizando el ingreso del mismo hacia la turbina gracias a la composición estructural mostrando mayor eficiencia de la técnica con relación a la hélice de molino de viento urbano convencional, para demostrarlo el aire es soplado o aspirado a través del túnel por medio de un ventilador o turbina [7].

En la investigación que habla acerca de los “Avances recientes en la investigación sobre el diseño y el uso de una turbina de tornillo de Arquímedes” [8] habla acerca del incremento de la energía obtenida de fuentes renovables, se diseñó esta investigación que explica el uso de la turbina de tornillo de Arquímedes enfocada en generar energía de los cursos de agua que presenta una ventaja mayor sobre otro tipo de técnica, pues este proceso se suministra de manera continua. Esta técnica también incluye a caudales pequeños reemplazando a las turbinas Kaplan porque el tornillo de Arquímedes es más económico de construir y operar, reduciendo el impacto ambiental que las soluciones tradicionales.

El resurgimiento del tornillo de Arquímedes [9] menciona que la turbina de Arquímedes es una de las proezas de ingeniería más antiguas que aún se utiliza en la actualidad. Recientemente, ha experimentado un importante resurgimiento en la ingeniería moderna, al invertirse su funcionamiento como turbina y en Europa es usada desde 1994.

Se ha descubierto que este nuevo dispositivo de turbina presenta numerosas ventajas sobre los dispositivos actuales, con la simplicidad y robustez que la han mantenido en uso durante siglos.

La mayoría de las teorías de diseño existentes se basan en su uso como bomba; sin embargo, existen muchas diferencias clave entre su funcionamiento como bomba o turbina, como la dirección en la que fluye el agua a través del dispositivo.

Estados Unidos

Al habla del “Modelado y resultados experimentales de una turbina de tornillo de Arquímedes” [10] que habla específicamente de una pequeña central hidroeléctrica que utiliza un tornillo de Arquímedes de 0,84 m de diámetro. Definiéndose como una posible alternativa de solución frente a la energía hidroeléctrica, haciendo uso de pequeños arroyos o ríos, ejecutando un bombeo para generar energía disponible del caudal para la producción de energía en aplicaciones de baja presión.

Esta investigación habla acerca del [11] “Diseño de un sistema de generación micro hidráulica basado en un tornillo de Arquímedes que tiene como objetivo la construcción de un micro generador hidráulico de carácter didáctico que permita aprovechar la energía cinética del agua para la producción de energía eléctrica” Se construyó un micro generador hidráulico haciendo uso de la energía cinética del agua para producir energía eléctrica representando una herramienta didáctica de laboratorio para estudios académicos para potenciar la aplicación en zonas rurales a través de proyectos de vinculación con la sociedad. La propuesta ofrece una solución didáctica de bajo costo fácil de reproducir, que genera una potencia máxima de 8 (W) con un caudal de 10 (l/s), lo que permite abastecer una determinada demanda eléctrica, principalmente de iluminación.

En el estudio de diseño y construcción de un túnel de viento a escala para obtener datos mediante pruebas adinámicas realizado por Esteban Casa Lincango, [12] realizaron una simulación en ANSYS con distintas propuestas y dimensiones del túnel de viento, donde establecieron condiciones climáticas del flujo de aire para el sector Quito-Ecuador, para evaluar su funcionamiento se empleó un análisis aerodinámico en superficies que constan con una diferencia de ángulos donde demostraron la fuerza aplicada por el flujo de aire por medio de sensores de fuerza y a su vez visualizar fenómenos aerodinámicos. Uno de sus resultados fue que las gráficas con diferentes ángulos de ataque se pudieron notar que ambas tienen una forma característica en su curva, donde a medida que el ángulo aumenta la fuerza que proporciona el viento será mucho mayor donde el resultado una carga se sustentación negativa.

Ecuador

En el estudio de Implementación de un túnel de viento para vehículos a escala 1:18, [13] realizado en la universidad del norte de Ecuador, se utilizó ese tipo de túnel debido a los bajos costos de construcción, su objetivo principal radica en la necesidad que existía al momento de estudiar la aerodinámica de los automóviles, conocer los principios físicos, comportamiento del flujo del aire al circular en cuerpos sólidos donde fluye más la velocidad y forma de cada uno de ellos. Tuvieron en cuenta la utilización de ventiladores que cumplan con la función de generar y hacer circular el flujo de aire por el interior del túnel. Para finalizar su estudio llegaron a la comprensión que la optimización en el diseño de los vehículos es un punto clave de la industria automotriz.

En la investigación diseñada por García Guano Roosevelt Israel [14] que habla de la “Simulación numérica y experimental de una turbina de tornillo de Arquímedes fabricada en 3D para optimizar su rendimiento en energía hidro cinética” donde hicieron uso de software para diseñar la turbina y de esta manera personalizar el diseño con un diámetro de 0,2 m, una longitud de 0,4 m, 2 números de alabes con una inclinación de 42° y un ángulo de inclinación del tornillo de 30° y el enfoque principal fue analizar el comportamiento y presión del agua por la superficie helicoidal del tornillo.

La Implementación de un Sistema de Hidro-Generación Eléctrica Mediante una Turbina

Helicoidal para la Recuperación de Energía Aplicado en Peces Decorativas [15] se enfoca en el estudio de un desperdicio de energía potencial de los ambientes acuáticos generados por bombas sumergibles y para resolver el problema construyeron un embalse y un sistema de control para el desbordamiento del agua con el uso de turbos acrílicos y el resto de herramientas fueron diseñadas en 3D por resina y para la transmisión del motor se hizo uso de poleas. Los resultados obtenidos fueron notables. Se alcanzó un voltaje máximo de 3.46 voltios en el motor DC, y con la ayuda del convertidor elevador se obtuvo un voltaje de 12V, logrando una eficiencia del sistema del 74%.

Riobamba

Al hablar de un módulo didáctico de control caudal que en la investigación realizada por Edison Gavilema [16] explica la existencia de un laboratorio de control de la Escuela de Ingeniería Electrónica, Control y Redes Industriales EIE – CRI dentro de la ESPOCH y se ejecuta la investigación con método analítico para resolver ecuaciones o funciones de transferencia para

cada componente del sistema, con ayuda de un sensor de tipo turbina (KOBOLD) se mide el caudal para conocer la linealidad y exactitud, para el control de la planta se utilizó tarjeta de adquisición de datos de NATIONAL INSTRUMENTAL “My DAQ” encargada de realizar la comunicación entre interfaz de control y módulo de caudal de agua. Para el caudal en incremento o descenso se analiza con la velocidad con la bomba trifásica de marca BALDOR, mediante utilización del convertidor de frecuencia ACS350 de ABB. Pues finalizando la implementación de este proyecto sobre el problema investigativo se deduce que la aplicación de esta turbina es un sistema bastante confiable, presenta tiempos de respuesta muy rápidos para alcanzar y mantener el punto de consigna deseado, logrando controlar la variable caudal.

El diseño y simulación de una turbina hidráulica con tecnología biométrica para generar energía mecánica creada por Priscila Nataly Guanolema [17] proporcionando una solución innovadora para elaborar tecnologías sostenibles diseñando mecanismos naturales para resolver problemas técnicos haciendo uso de la energía cinética y potencial de los cuerpos de agua, imitando formas de organismos acuáticos como peces y ballenas jorobadas para la Casa Cóndor que cuenta con un caudal constante de $0.484 \text{ m}^3/\text{s}$ tomando en cuenta la seguridad ambiental, impacto ecológico, eficiencia energética y facilidad de mantenimiento, usando herramientas estructuradas como la matriz QFD y el análisis morfológico. Un avance significativo fue la incorporación de los tubérculos de ballenas jorobadas, que mejoran la estabilidad y reducen la resistencia del flujo, optimizando la conversión energética.

2.2 Marco teórico

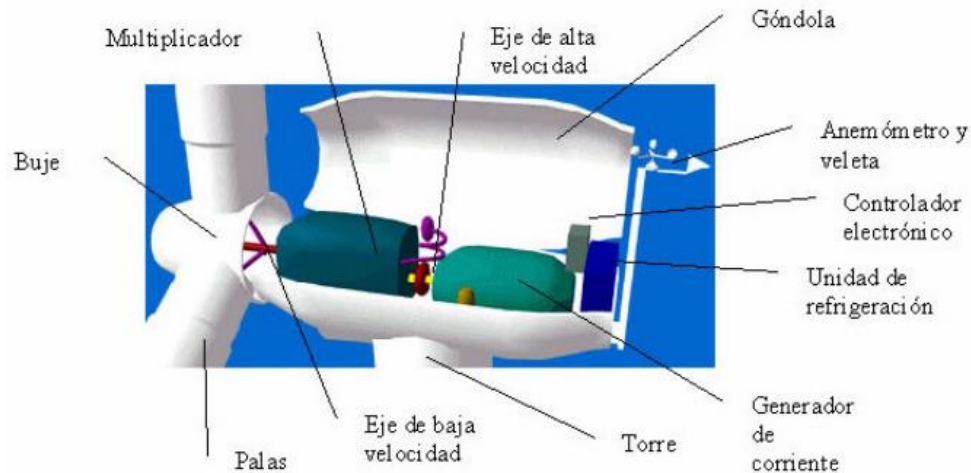
2.2.1 Aerogeneradores

Es considerado un aerogenerador aquella herramienta que captura la energía del viento y al transforma en energía eléctrica y actualmente son denominados como “los molinos de viento del tercer milenio” elaborada con 3 palas que giran entre 13 y 20 revoluciones por minuto, ya sea a velocidad constante o variable que de acuerdo a la intensidad del viento el rotor girará y está establecida una vida promedio de 25 años [18].

Los elementos más importantes de los aerogeneradores son: las palas, el buje, el equipo multiplicador de potencia, los ejes de alta y baja velocidad, el generador, el controlador electrónico y la torre.

El bastidor o góndola es la estructura en la cual se montan los distintos componentes del aerogenerador. En la góndola se monta el buje, el multiplicador de velocidad, los ejes y el generador [19]

Figura 1. Partes de aerogenerador



Elaborado por: Erik Romero

Fuente: [19].

2.2.2 Funciones del aerogenerador

Los aerogeneradores cuentan con orientación automática que permite aprovechar al máximo la energía cinética del viento y con ello el giro de las palas que se mueven acorde a la velocidad del viento de al menos 3,5 m/s proporcionando la máxima potencia de 11 m/s y si se presenta mayor velocidad el rotor hace girar un eje lento conectado a una multiplicadora que eleva la velocidad del giro transfiriendo la energía al generador acoplado y se conduce al interior de la torre hasta la base y se dirige por líneas subterráneas hasta la subestación y todas estas acciones están monitorizadas y son supervisadas desde la estación central [20] .

Aerogenerador de eje horizontal

Cuentan con turbina horizontal similar a una hélice y casi todos los sistemas de energía eólica establecidos comercialmente utilizan aerogeneradores horizontales, gracias al control del paso de las palas y la función autónoma, se puede moderar la velocidad del rotor y la potencia de salida de aire, protegiendo así la turbina eólica al exceso de velocidad. El número de palas utilizadas para la generación de energía eléctrica suele variar entre 1 y 3; con tres palas, existe un equilibrio entre el coeficiente de potencia, el coste y la velocidad de rotación del sensor de viento [21].

Y al hablar de la velocidad de giro que proyecta el aerogenerador de eje horizontal, depende estrictamente del número de palas que cuenta cada aerogenerador ya sea para proporcionar más velocidad o no y acorde a la necesidad de cada investigación.

Figura 2. Aerogenerador de eje horizontal



Elaborado por: Erik Romero
Fuente: [19].

Aerogenerador de eje vertical

Creado en 1925 enfocado en proporcionar una alternativa de generador de energía moderna presenta palas en forma de curva dificultando su fabricación y el rotor gira en eje vertical y las palas se fijan de forma puntal, hay dos tipos de tipo ejes verticales el Savonius y las de eje vertical en forma de V. La turbina eólica de eje vertical con rotor en H utiliza palas rectas en lugar de palas curvas, presentando una relación de velocidad de punta muy baja y un bajo coeficiente de potencia, por lo que se utilizan únicamente en sistemas de energía eólica de muy baja potencia [21]. Principalmente se habla de **DARRIEUS** patentadas por G. Darrieus el año 1931 y desarrolladas luego por el Laboratorio Sandia en los años 70.

0Figura 3. Aerogenerador de eje vertical



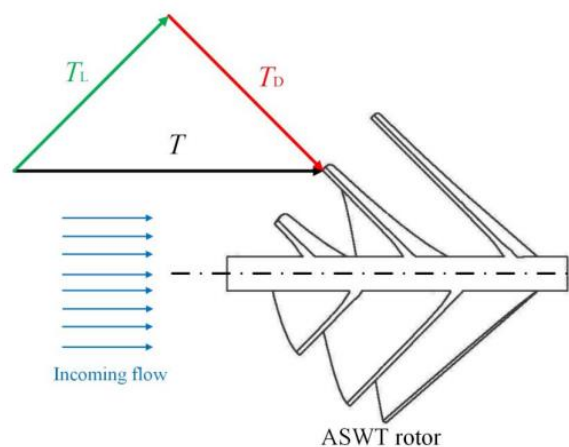
Elaborado por: Erik Romero

Fuente: [19].

2.2.3 Aerogenerador Tipo Tornillo de Arquímedes

El aerogenerador tipo Tornillo de Arquímedes (Archimedes Spiral Wind Turbine, ASWT) es un diseño emergente basado en una pala helicoidal que capta el flujo de aire de manera continua a lo largo de su hélice con un sistema de regulación de velocidad. Su operación es silenciosa, estable y eficiente a bajas velocidades, ideal para entornos residenciales o urbanos. Hace algunos años se centraba en la energía eólica para zonas rurales y para las grandes ciudades se hacía uso de máquinas térmicas, pero hoy en día el incremento radical de la tecnología permite incluir esta herramienta para facilitar la producción de energía [22].

Figura 4. Análisis de la fuerza aerodinámica del rotor ASWT



Elaborado por: Erik Romero

Fuente: [22].

Hoy en día la demanda energética y el cuidado ambiental explota el uso de un sistema eólico que se incluye en zonas urbanas con un incremento eficiente de energía que alcance las necesidades de la sociedad, e incluir el tornillo de Arquímedes para efectuar este proceso es una alternativa efectiva por la capacidad funcional con velocidades de viento moderadas, reduciendo así costos operativos y mejorar la sostenibilidad energética local [23].

Los parámetros más influyentes en su rendimiento son el número de hélices, el paso del tornillo, el ángulo de ataque y la longitud efectiva de la turbina y al aumentar el número de palas mejora el proceso de arranque, pero también incrementa la resistencia; por tanto, la optimización geométrica de la turbina resulta muy importante frente a la eficacia de aplicar este proceso de creación de energía a partir del viento [22].

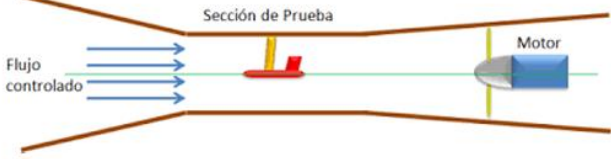
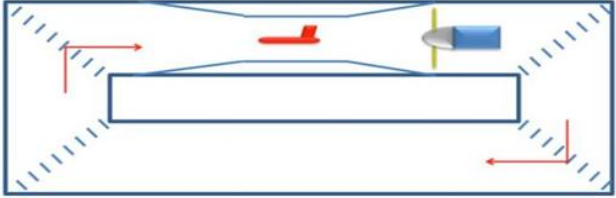
En simulaciones, el modelo de tornillo de Arquímedes permite explorar escenarios de baja velocidad que para 2050 el uso de esta herramienta alcanzará hasta el 40% de la producción eléctrica, proporcionando turbulencia variable y cargas estructurales. Su potencial de integración con otras fuentes renovables (como paneles solares) amplía su relevancia para proyectos de energía híbrida [24].

Esta turbina representa un campo fértil de investigación a lo largo de estos años en simulación y diseño asistido por computadora, con posibilidades de innovación tanto en la modelación como en la fabricación aditiva (impresión 3D) reduciendo de manera global los recursos económicos y mejorar el sistema de energía a base del viento con uso del túnel de Arquímedes y su preciso diseño que transfiera un correcto transporte eléctrico [24].

2.2.4 Túnel de viento

El túnel de viento es un dispositivo que genera flujo de aire controlado y uniforme en el que se colocan modelos a escala de objetos para estudiar su comportamiento aerodinámico. Su funcionamiento consiste en impulsar o succionar aire del ambiente a través de un ducto, alrededor de un modelo estacionario de distinta geometría, con el fin de alcanzar una velocidad específica y un patrón de flujo predeterminado en un instante dado [13].

Tabla 1.Tipos de túnel de viento

Circuito abierto	El aire fluye en una sola dirección y es expulsado después de pasar por la sección de prueba.	
Circuito cerrado	el aire recircula en un circuito continuo, permitiendo un control más preciso y eficiente del flujo de aire	

Elaborado por: Erik Romero

Fuente: [13].

2.2.5 Velocidad de flujo en su interior

Se considera un principio físico creado por Arquímedes hace muchos años atrás y se entiende que el tornillo parcialmente sumergido a un fluido de agua en reposo o en corriente constante, realizará un movimiento continuo de abajo hacia arriba, eso quiere decir que el tornillo se encargará de subir el agua gracias al movimiento y se denomina empuje hidrostático medido en newtons, que a continuación se muestra la fórmula que se usa para medir [25].

Fórmula: $E=mg=pfgV$

- Túnel subsónico

Son túneles de baja velocidad, donde el aire puede ser considerado como incompresible. Son utilizados para operaciones de bajo número de Mach (parámetro adimensional que relaciona la velocidad del flujo con la velocidad del sonido local en fluidos en el mismo estado), es decir con velocidades de hasta 400km/h ($M \leq 0.3$) [13].

Figura 5. Túnel subsónico



Elaborado por: Erik Romero

Fuente: [13].

- Túnel transónico

Tienen los mismos principios que los túneles subsónicos con la diferencia de que estos alcanzan grandes velocidades, llegando en la sección de prueba muy cerca de la velocidad del sonido. El flujo transónico tiene una medida de $(0.7 < M < 1.2)$ [13].

Figura 6. Túnel transónico



Elaborado por: Erik Romero

Fuente: [13].

- Túnel de viento supersónico

Produce velocidades supersónicas ($1.2 < M < 5$). El número de Reynolds se varía cambiando el nivel de densidad (presión en el comportamiento que coloca). Se requiere un cociente de alta presión (para un régimen supersónico en $M=4$, este cociente está de la orden de 10). Aparte de eso se puede producir la condensación o la licuefacción, esto significa que un túnel de viento supersónico necesita sequedad o facilidad de precalentamiento. El túnel de viento supersónico tiene una demanda grande de energía al alcanzar solamente la operación intermedia [13].

Figura 7. Túnel de viento supersónico



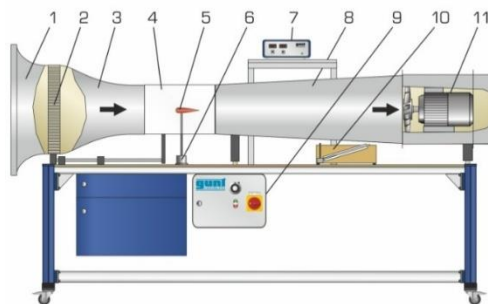
Elaborado por: Erik Romero

Fuente: [13].

- Túnel de viento hipersónico

Genera un campo de flujo hipersónico en la sección de trabajo. La velocidad de estos túneles varia de Mach 5 a 15. Como con los túneles de viento supersónicos, estos tipos de túneles deben funcionar intermitentemente con los cocientes de muy alta presión al inicializarse, puesto que la temperatura se amplía con el flujo, en el interior, el aire tiende a licuefactarse. Por esta razón, el precalentamiento es particularmente crítico[13].

Figura 8. Túnel de viento hipersónico



Elaborado por: Erik Romero

Fuente: [13].

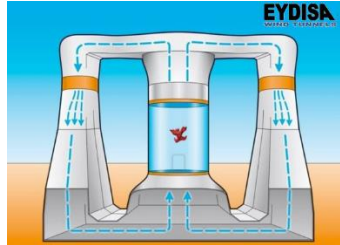
2.2.6 Dirección del Flujo

Túnel de Viento Vertical

Un túnel de viento vertical es un gran cilindro, cerrado o descubierta, con grandes ventiladores o turbinas ubicadas en la parte interior del túnel que generan una potente corriente de viento hacia arriba, la cual logra mantener suspendido un cuerpo, simulando caída libre a una velocidad superior a los 195 km por hora. Esta velocidad de un cuerpo en caída libre se denomina Velocidad Terminal. Al igualarse las fuerzas del viento y del cuerpo, este logra flotar a una velocidad constante [13].

Este tipo de túnel se utiliza para aplicaciones deportivas, al ser de caída libre, simula las condiciones de paracaidismo. Existen túneles que logran sostener a los deportistas a más de veinte metros de altura, lo cual ofrece una amplia posibilidad de improvisar movimientos y giros de gran dificultad [13].

Figura 9. Túnel de viento vertical



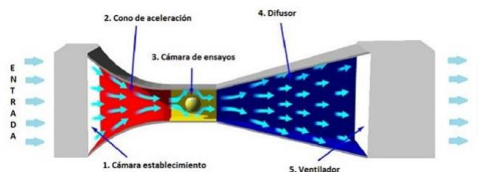
Elaborado por: Erik Romero

Fuente: [13].

Túnel de Viento Horizontal

El flujo de aire se efectúa en forma horizontal. Sus aplicaciones son más generales, desde aplicaciones automotrices, hasta análisis aeronáutico, incluyendo navales, e igualmente deportivas como son ciclismo, sky, entre otros. Su rango de velocidad puede ir desde subsónicas hasta hipersónicas [13].

Figura 10. Túnel de viento horizontal



Elaborado por: Erik Romero

Fuente: [13].

2.3 Aerogeneradores eólicos de baja tensión

Es un tipo de aerogeneradores que proporcionan una potencia máxima de 100Kw y es usada en las zonas urbanas que permiten alcanzar y proporcionar energía a viviendas o espacios pequeños y se encuentran alrededor de las ciudades.

2.4 Energía

Es la capacidad de un cuerpo de generar cambios en ellos mismos como el movimiento, el calor o la luz y según la ley de conservación de energía se habla que puede ser transformada o

transferida, pues la energía no muere ni se crea y de esta manera la cantidad de energía siempre será la misma, para generar energía cuando se realiza un trabajo y al hablar de transformación ocurre cuando una parte se usa para realizar un trabajo y la otra se transforma en otro tipo de energía [26].

2.4.1 Clasificación de energía

Se clasifican en varias energías según su propiedad, fuente de origen y la acción.

Energía Potencial

Depende de la masa del objeto y la posición y se concentra en un cuerpo en reposo almacenado, haciendo comparación con otro cuerpo. Se puede observar un incremento cuando los cuerpos atraídos se separan o cuando los cuerpos rechazados o repelidos se combinan. Al hablar de una masa líquida se puede entender que contiene energía de presión o gravitatoria [27].

Energía Cinética

Se denomina energía cinética considerada en acción o movimiento y esto depende de la cantidad de masa del cuerpo, así como de la velocidad que ejerce la acción, por ejemplo: una bola de boliche al contener una masa más grande y a mayor velocidad podrá derribar más bolos.

Se obtiene energía cinética de varias fuentes como es el aire que proporciona energía eólica y permitirá mover el aire y las turbinas eólicas lo utilizan para generar electricidad [27].

2.4.2 Energía cinética a energía eólica

Charles Francis Brush construyó en 1887 la primera turbina eólica automática que genera hoy en día electricidad convirtiéndose en energía renovable que hoy en día es crucial para un funcionamiento correcto de los servicios eléctricos para ciudades grandes y es generada con ayuda de aerogeneradores o turbinas eólicas obtenidas con la fuerza del viento produciendo un impacto ambiental muy bajo.

El aire caliente tiene la tendencia de ir hacia arriba, mientras que el aire frío tiende a ir hacia abajo y mediante estos movimientos se genera el viento haciendo uso para crear la energía eólica [27].

Energía eólica

Entre las fuentes de energía alternativas, la energía eólica es uno de los sectores de mayor crecimiento. Sin embargo, los aerogeneradores convencionales presentan limitaciones, especialmente en su aplicación en zonas densamente pobladas y con una velocidad media del

viento a largo plazo más baja. En el futuro, el aerogenerador Arquímedes podría contribuir a un aprovechamiento aún más significativo del potencial de la energía eólica [28].

- **Energía eólica terrestre**

También mencionada onshore y la función principal es la obtención del viento o energía cinética a energía eléctrica son agrupadas en zonas costeras moviendo las aspas de los generadores y así producen la energía y se guarda en una planta de almacenamiento de energía eólica para integrarla posteriormente en la red de distribución y transmitir la electricidad a los hogares a través de la red eléctrica [28].

- **Energía eólica marina**

También conocida como (offshore) aprovecha de la misma manera la energía de eólica terrestre y la única diferencia es que en este caso las turbinas generadoras de energía se encuentran sumergidas en el océano para aprovechar los fuertes vientos que se producen en alta mar y a diferencia de los parques eólicos terrestres, estos se encuentran en aguas poco profundas máximo a 3 kilómetros de la costa para así usar de mejor manera el viento, alejado de las zonas de mayor interés natural [28].

2.4.3 Energía eléctrica

Se produce gracias a la transformación de alguna clase de energía, puede ser química, mecánica, térmica, luminosa a energía eléctrica y actualmente se depende aún más de este tipo de servicio para poder tener presente en los rayos y tormentas eléctricas y se obtienen dos tipos de energía ya sea renovable o no renovable. La energía renovable es inagotable porque se encuentra en la naturaleza y la misma no contamina el ambiente [29].

Producción de electricidad

La diferencia de potencial o tensión eléctrica entre dos puntas es quien producirá la energía eléctrica y esto se puede dar por inducción desplazándose un conductor eléctrico en el campo magnético y por acción de la luz al colocar sobre ciertos materiales aparece un flujo de corriente y las células fotovoltaicas aprovechan esta energía, tal como se ha visto en temas anteriores [30].

2.5 Tornillo de Arquímedes y la energía

Se sabe que el uso industrial del tornillo de Arquímedes es importante hace muchos años atrás y se ha ejecutado para el drenaje y recuperación de tierras, así como el riego y el transporte de

materiales mixtos (sólidos granulares, sólidos en suspensión) y especialmente se ha usado como un generador de energía, gracias a su capacidad de usar el aire del ambiente con las palas similares a la de un helicóptero para producir la energía suficiente y otorgar a una ciudad [31].

El rendimiento de una turbina eólica espiral de Arquímedes se analiza mediante la simulación y se comprueba mediante una prueba de campo, está caracterizada por ser una turbina eólica de arrastre de eje horizontal. Pero al aplicar el método de dinámica de fluidos computacional (CFD). A partir de la simulación, se obtiene el coeficiente de potencia, conocido como eficiencia mecánica del rotor, y la relación de velocidad de punta. El coeficiente de potencia máximo y la relación de velocidad de punta correspondientes resulta ser de 0,293 y 2,19, respectivamente [32].

CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO

Este proyecto de investigación aplicativo cuenta con un enfoque metodológico descrito a continuación:

3.1 Enfoque de investigación

Cuenta con enfoque mixto, eso quiere decir que es cualitativo y cuantitativo porque se hace uso de plataforma SPSS para el desarrollo estadístico y el análisis de la investigación que permita conocer los alcances y la efectividad de emplear esta idea, también se entiende que es cualitativa porque describe de manera detallada cada variable de investigación analizando los hechos de manera simultánea y en ambos enfoques se establece un planteamiento del problema, trabajo en campo, diseño de estudio, la definición de muestra, recolección de datos, el análisis de datos y la elaboración de resultados para presentar el proyecto de investigación.

Este enfoque se encuentra basado en el paradigma positivista, donde lo que interesa es la medición y la cuantificación, puesto que a través de la medición se pueden obtener tendencias, plantear nuevas hipótesis y de esa manera construir teorías. Este enfoque utiliza la estadística como herramienta para la cuantificación [33].

3.2 Diseño de investigación

Es considerado un diseño no experimental porque no hay un cambio o manipulación de las variables de investigación permitiendo un análisis amplio y concreto tal y como se presentan y para desarrollar este proyecto se tomó en cuenta la variable independiente como el mayor eje central que permita entender la importancia de la simulación del aerogenerador para la producción de energía.

Es aquel que se realiza sin manipular deliberadamente variables. Se basa fundamentalmente en la observación de fenómenos tal y como se dan en su contexto natural para después analizarlos Enfocada en categorías, conceptos, variables, sucesos, comunidades o contextos que ya ocurrieron o se dieron sin la intervención directa del investigador. Es por esto que también se le conoce como investigación «ex post facto» (hechos y variables que ya ocurrieron), al observar variables y relaciones entre estas en su contexto [34].

3.3 Métodos de Investigación

Considerado descriptivo porque mediante el análisis y recolección de información de ambas variables de estudio permite entender la importancia del desarrollo de esta investigación

redactando el proceso que se lleva a cabo con ayuda de herramientas de software y aplicaciones estadísticas para obtener los resultados.

La investigación descriptiva se enmarca dentro de la metodología no experimental y, como su propio nombre indica, consiste en describir una situación real natural mediante la observación sistemática no participante o valiéndonos de preguntas a una muestra de personas capaces de proporcionar la información deseada sobre opiniones, comportamientos o circunstancias [35].

3.4 Tipo de investigación

Se considera una investigación aplicada porque se desarrolla dentro de la universidad explicando el proceso de simulación mediante el uso del tornillo de Arquímedes para la generación de energía con un tiempo de 5 meses desde la aprobación del proyecto.

Se enfoca en identificar a través del conocimiento científico, los medios (metodologías, tecnologías y protocolos) por los cuales se puede contribuir a solucionar una necesidad reconocida, práctica y específica [34].

3.5 Técnicas de recolección de datos

La simulación computacional permitió evaluar diferentes diseños y condiciones sin necesidad de realizar pruebas físicas costosas y a gran escala. Ayudando a predecir el comportamiento del flujo de viento y optimizar el diseño de la construcción real en un futuro, asegurándonos eficiencia y reducción de riesgos y costos.

Con el uso de software se especificó el poder crear modelos virtuales y simular el comportamiento de sistemas físicos bajo diversas condiciones, se empleó el diseño del túnel de viento y el aerogenerador tornillo de Arquímedes, utilizando herramientas como INVENTOR y FLOW SIMULATION o ANSYS Fluent.

Y para el desarrollo de los datos estadísticos se aplicó con ayuda del SPSS 2.5 que permitió identificar la importancia y fiabilidad de la investigación para entender la funcionalidad del simulador.

3.6 Población y muestra

La población del estudio está constituida por todas las posibles configuraciones geométricas y condiciones operativas del aerogenerador tipo tornillo de Arquímedes aplicables a sistemas de generación eléctrica en baja tensión.

La muestra estuvo conformada por los escenarios de simulación seleccionados, comprendiendo un rango de velocidades de viento entre X y Y m/s, configuraciones geométricas específicas del tornillo y condiciones de carga en baja tensión definidas para la evaluación del rendimiento energético.

3.7 Métodos de análisis

Inicialmente se usa una recolección bibliográfica de las variables de estudio mediante la obtención de artículos científicos en plataformas como: IEEE Xplorer. Scopus. Google académico y más, que aportan sistemáticamente información científica que permitió entender con mayor claridad la importancia de desarrollar esta investigación.

3.8 Procesamiento de datos

Esto se realizó con la ayuda de la herramienta estadística SPSS y así reflejar el nivel de confiabilidad de la simulación frente a la producción de energía para demostrar que aplicar este tipo de proyectos alcanza un nivel de educación mayor.

Para la primera etapa, se empezó buscando información relacionada con trabajos investigativos, tesis y demás fuentes bibliográficas confiables, se utilizó como fuente fiable artículos publicados en IEEE, ProQuest y Scopus. Se analizó el aerogenerador tornillo de Arquímedes y también el túnel de viento teniendo en cuenta sus parámetros geométricos y coeficiente de potencia.

En la segunda etapa se realizó la simulación en el software Inventor o SolidWorks, donde se diseñó el túnel de viento empleando materiales que se asemejen a los utilizados en la realidad, mediante pruebas virtuales para obtener un diseño final. En esta fase se consideró materiales que podrán emplearse en una futura construcción, como aluminio para la estructura, acrílico o vidrio para las ventanas de observación, lamina metálica para los paneles y un ventilador axial similar al que se utiliza en la versión física. También se inició con la simulación de aerogenerador de Tornillo de Arquímedes. Modelado en el software con sus características geométricas y condiciones de operación particulares, para analizar su comportamiento aerodinámico dentro del túnel.

En la tercera etapa, teniendo el aerogenerador y el túnel de viento, se procedió a realizar las pruebas del aerogenerador dentro del túnel de viento, después se realizaron las mejoras en el diseño geométrico para poder maximizar el coeficiente de potencia y la eficiencia energética.

En la etapa final, la cuarta, se evaluaron parámetros como la distribución de flujo de aire, el par generado y la eficiencia de cada diseño, permitiendo comparar el desempeño bajo condiciones controladas para evaluar el rendimiento del aerogenerador tipo tornillo de Arquímedes.



3.9 Operación de las variables

La variable dependiente

Tabla 2. Variable dependiente

Variable	Dimensiones	Indicadores	Instrumento	Escala
Rendimiento energético del aerogenerador medido en términos de potencia eléctrica generada y eficiencia de conversión.	Alcance energético por medio de la simulación	Potencia generada (W). Par (torque) obtenido (N.m).	Simulación CFD en SolidWorks. Gráficas de velocidad y presión. Exportación de datos para análisis.	Cuantitativa

Elaborado por: Erik Romero

Tabla 3. Variable independiente

Variables	Dimensiones	Indicadores	Instrumento	Escala
Parámetros operativos y geométricos del aerogenerador	Configuración aerodinámica	Configuración geométrica. Tipo de rotor seleccionado.	Modelados 3D en SolidWorks. Simulación del aerogenerador.	Cuantitativa

Elaborado por: Erik Romero

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el siguiente capítulo se hablará de los resultados y las simulaciones que se obtuvo del aerogenerador tornillo de Arquímedes dentro del túnel de viento, los cuales fueron simulados en el software SOLIDWORKS, algo que se debe tener en cuenta que las condiciones fueron hechas específicamente para la ciudad de Riobamba, se estudió los parámetros ambientales que fueron: la presión, la temperatura, la velocidad del viento y humedad; también la altura y temperatura sobre el nivel del mar (msnm) que son 2754 msnm y la temperatura de 14° C (287,15 K) tomando en cuenta el estudio realizado para mostrar la mejor realidad posible, se realizó con diferentes temperaturas, una baja, media y alta de 4,9° C (278,05 K), 14° C (287,15 K) y 25,4° C (298,55 K) respectivamente y lo mismo para la velocidad del viento.

La presión atmosférica se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$P = \frac{1013.25}{e^{\left(\frac{z}{8430,15 - z * 0,09514}\right)}} * 100 \quad (1)$$

Dónde:

Z = representa la altura (2754 m)

$$P = \frac{1013.25}{e^{\left(\frac{2754}{8430,15 - 2754 * 0,09514}\right)}} * 100$$

$$P = 72324,96 \text{ Pa}$$

La densidad del aire se calcula en base en la ecuación general de los gases, la cual es:

$$\rho = \frac{P}{R * T} \quad (2)$$

Dónde:

$$P = 72324.96 \text{ Pa}$$

$$\rho = (kg/m^3)$$

$$R = \text{Constante del gas para el aire } \left(287 \frac{Pa * m^3}{kg * K}\right)$$

$$T = (286.15 \text{ K})$$

$$\rho = \frac{72324.96 \text{ Pa}}{287 \frac{\text{Pa} * \text{m}^3}{\text{kg} * \text{K}} * 287.15 \text{ K}}$$

$$\rho = 0,878 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Un valor necesario para el diseño del túnel de viento es la velocidad del diseño, ya que es la máxima velocidad del viento que va a producir el ventilador, la ecuación que se ocupó es importante en las maquinas eólicas en eje horizontal, añadiendo dos factores, coeficiente de potencia (C_p) y la eficiencia del sistema (η_g) mediante el producto de la eficiencia mecánica (η_{mec}) y la eficiencia eléctrica (η_{elec}) del rotor.

$$V = \sqrt[3]{\frac{2 * P_{elec}}{\pi * \rho * r^2 * C_p * \eta_g}} \quad (3)$$

Dónde:

V = Velocidad del diseño (m/s)

P_{elec} = Potencial eléctrico del ventilador axial (225 W)

$$\rho = 0,878 \text{ Kg/m}^3$$

r = Radio del ventilador axial (0.225 m)

C_p = Coeficiente de potencia, determina el cambio de energía cinética en mecánica, de acuerdo a la ley de Betz (0.45) [36]

η_{mec} = Eficiencia global del rotor ($\eta_{mec} * \eta_{elec} = 1 * 0.9 = 0.9$)

$$V = \sqrt[3]{\frac{2 * 225 \text{ W}}{\pi * 0.878 * (0,225)^2 * 0,45 * 0.9}} \quad (4)$$

$$V = 19,96 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Para la selección del ventilador axial, se hizo una búsqueda y comparación con estudios anteriores, el cual se llegó a la conclusión de que el mejor para un túnel de viento abierto HEPT -45-6 M/H, el cual por sus mediadas y radio fue el seleccionado. Teniendo en cuenta la densidad

baja también es necesario un rotor con potencias altas para que pueda mover el aire dentro del túnel de viento.

Para obtener el número de Mach, primero se trabajó con la velocidad del sonido a 14° C (287.15 K) con la ayuda de la siguiente ecuación:

$$C = 331 \frac{m}{s} * \sqrt{\frac{T}{273,15 K}} \quad (5)$$

Dónde:

T= Temperatura en la ciudad de Riobamba (287,15 K)

$$C = 331 \frac{m}{s} * \sqrt{\frac{287,15}{273,15 K}}$$

$$C = 339,79 \frac{m}{s}$$

Ahora se calculan los números de Mach:

$$Ma = \frac{V}{c} \quad (6)$$

Donde:

V= (19.96 m/s)

c= (339,79 m/s)

$$Ma = \frac{19,96 \frac{m}{s}}{339,79 \frac{m}{s}}$$

$$Ma = 0,059$$

En la ciudad de Riobamba se encuentra en un punto alto de la región interandina, tiene una presión atmosférica de 72324,96 Pa y una densidad de aire de $0,878 \frac{kg}{m^3}$, son valores bajos comparados con los niveles del mar, pero teniendo en cuenta la ubicación de la ciudad de Riobamba y los factores ambientales, se utilizará para el diseño en el software.

También, visto en el capítulo anterior y con lo que se obtuvo un valor de Ma inferior a los 0,6 el túnel de viento que se diseñó es de tipo subsónico, donde las velocidades internas no superaran a la del sonido, donde se obtuvo $339,79 \frac{m}{s}$. Considerando que el aire como fluido incompresible dentro del túnel de viento, permitiendo cálculos y análisis con ecuaciones simplificadas de Navier Stokes que el software tomará para estos tipos de fluidos.

Dimensionamiento del túnel de viento

Al momento de plantear este proyecto, se toma en cuenta que el túnel de viento va a ser para fines didácticos dentro de la universidad, también para poder realizar pruebas de aerogeneradores de baja potencia, tomando como referencia, lo antes mencionado, la región de pruebas no debe ser muy grande o sobrepasar las medias de $0,07 m^2$, que las velocidades del viento no sean muy superiores o se encuentren en el rango de la ciudad de Riobamba, las cuales no fueron superiores a los 35 m/s y que la potencia del ventilador no sea mayor a 8 kW. Eso quiere decir que, con estos parámetros, el túnel de viento describe parámetros didácticos de estudio y se desarrolla para entender mejor el funcionamiento y objetivo de este proyecto.

Propulsor

Es muy importante saber qué tipo de propulsor o ventilador se va a elegir, en este caso el desarrollo de este proyecto se basará en estudios previos y lo que más se usa dentro de túneles o conductos son los de tipo axial, que son los ventiladores con hélices que empujen el aire en una sola dirección, para generar un caudal alto con baja presión y son ligeros y fácil de instalar. Se deseaba analizar entre un ventilador axial HEPT -45 -6M/H y un ventilador axial AC – Vent -45 pero al identificar la potencia, las dimensiones, caudal del aire y la facilidad para adquirirlo se optó por el ventilador axial HEPT -45 -6M/H.

Las características principales son:

Tabla 4. Ventilador Helicoidal tubular

HEPT	Ventilador helicoidal tubular
<i>Diámetro (mm)</i>	450
<i>Numero de aspas</i>	6
<i>Caudal</i>	Alto
<i>Caudal máximo de aire (m³/h)</i>	4900
<i>Velocidad (rpm)</i>	955
<i>Potencia de entrada (w)</i>	225
<i>Peso (kg)</i>	15,5
<i>Velocidad angular (rpm y rad/s)</i>	955 y 100,01

Elaborado por: Erik Romero

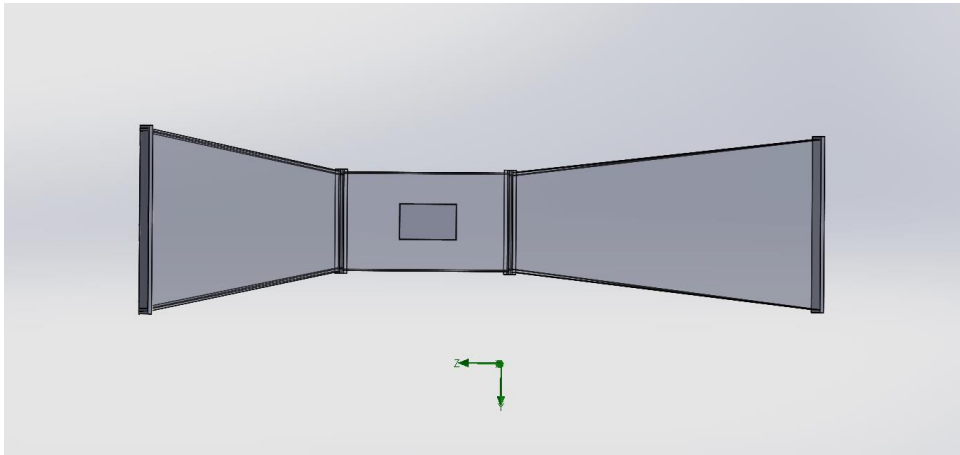
Fuente: Instituto Nacional de meteorología e Hidrología (INAMHI)

Dimensiones del túnel de viento abierto

En este apartado se hablará del dimensionamiento del diseño y modelado tridimensional del túnel de viento abierto, se hablará del difusor, zona de prueba y el contrato; fueron modelados en el software SOLIDWORKS y gracias a la ayuda de la dinámica de fluidos computacional (CFD) se va a simular el comportamiento del aire dentro del túnel de viento.

Los materiales que se utilizaron para la construcción es el acero, fácil de conseguir y vidrio templado para que no tenga vibraciones o exista turbulencias dentro de la zona de pruebas. Se instaló una abertura para poder ver en el interior como circula el aire dentro del zona de pruebas y como los aerogeneradores de baja potencia actúan con las diferentes velocidades del viento.

Figura 11. Diseño del túnel de viento abierto.

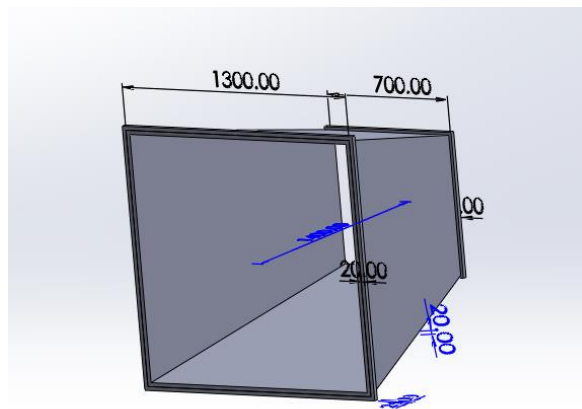


Elaborado por: Erik Romero
Fuente: SOLIDWORKS.

Contractor (Cono de Contracción)

En esta zona, aumenta la velocidad del flujo en la parte angosta, cumpliendo el principio de Venturi, en la siguiente figura se expone su diseño y sus medidas.

Figura 12. Contractor.

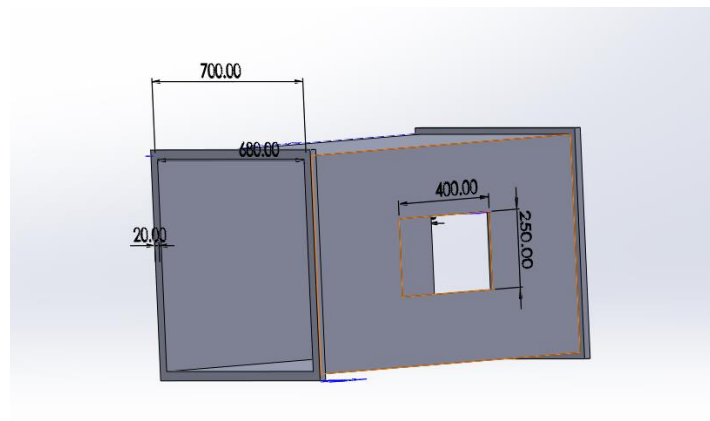


Elaborado por: Erik Romero
Fuente: SOLIDWORKS.

Zona de Pruebas

Aquí es donde se colocan los diseños en este caso los aerogeneradores, por eso es una de las partes más importantes, aquí se podrá analizar cómo afecta el flujo del aire, en la figura siguiente se muestra su diseño el cual se implementó una rejilla o una parte con vidrio templado para poder ver su interior.

Figura 13. Zona de Pruebas diseñado.

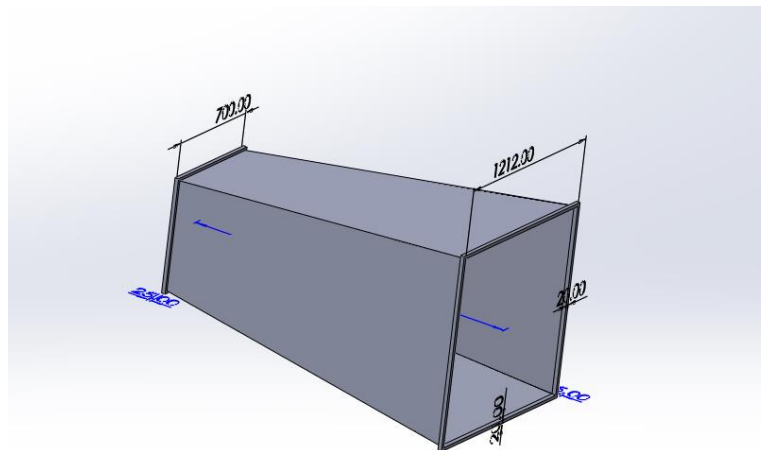


Elaborado por: Erik Romero
Fuente: SOLIDWORKS.

Difusor (Tobera de descarga)

Esta parte del túnel de viento suaviza salida del flujo, ayudando a la reducción de turbulencias, también disminuye la velocidad de salida del flujo de aire, sus medidas y diseño se muestra a continuación.

Figura 14. Difusor diseñado.

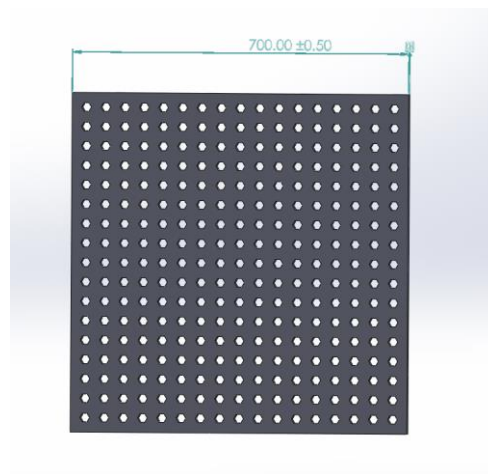


Elaborado por: Erik Romero
Fuente: SOLIDWORKS.

Panel enderezador de flujo

Esta parte es muy importante dentro de la estructura, va entre el ventilador axial y el contractar, ayuda a que el aire no llegue a la zona de pruebas de manera turbulenta y en distintas direcciones, ayuda a que el aire vaya de forma uniforme, en una sola dirección y paralelo reduciendo turbulencias. Una manera económica de poner hacer en forma física es con la implementa de sorbetes o tubos delgados del mismo tamaño y diámetro para que el flujo del aire ingrese y salga de forma uniforme. El diseño y medidas son las siguientes.

Figura 15. Panel enderezador de flujo.



Elaborado por: Erik Romero

Fuente: SOLIDWORKS.

Se tuvo en cuenta para futuros diseños físicos para el laboratorio de la Universidad, el diseñar las estructuras con una saliente del acero, con eso permitir un mejor ajuste con turcas, así evitar que el túnel se mueva o produzca fricción por las velocidades del flujo del viento que produce el rotor.

Simulación del túnel de viento

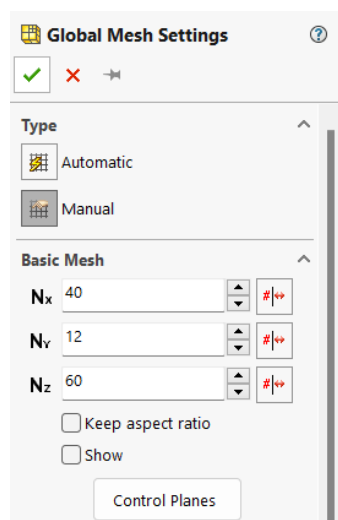
Se realiza con la herramienta CFD de SOLIDWORKS que permite enviar flujo de aire, para simular el túnel de viento y ver si no existen algún problema, si están bien realizados los cálculos, medidas se podrá probar los aerogeneradores de baja potencia. Hay que tener en cuenta que se ingresan los parámetros de la ciudad de Riobamba. Donde se aplicará todos los cálculos necesarios con los datos de presión atmosférica, temperatura, velocidad de viento y humedad.

Primero es necesario hacer un mallado por segmentaciones en el dominio que va a ser la parte interna del túnel de viento, aquí el programa CFD ayudará a calcular y el poder visualizar que sucede dentro del túnel de viento.

Aquí las variables que se necesitaron son la presión atmosférica, velocidad, temperatura, humedad y numero de Math, las cuales se introducirán en el mallado, dónde se utilizará un mallado básico de forma de cuadrilátero, se lo llama mallado no estructurado.

En el túnel de viento se aplicó un mallado no estructurado, con la función Global Mesh, se configura del modo al que se va a necesitar, la opción automático o manual. Para esta investigación se usará el mallado manual para tener un control preciso.

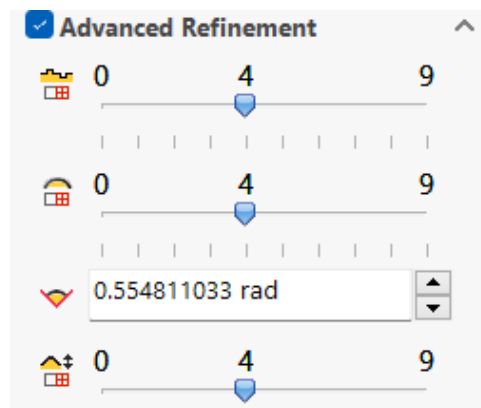
Figura 16. Configuración de mallado manual.



Elaborado por: Erik Romero
Fuente: SOLIDWORKS.

En esta misma configuración existen opciones avanzadas las cuales se activarán y son el nivel de refinamiento de sólidos pequeños, nivel de la curvatura y tolerancia, por lo que no es tan complejo la geometría del túnel del viento, pero se aplicará para lograr un equilibrio en las simulaciones, también para no comprometer mucho al procesador de la computadora ya que el software exige muchos componentes al momento de simular.

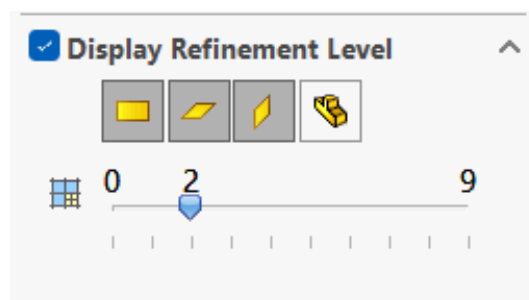
Figura 17. Rendimiento del mallado.



Elaborado por: Erik Romero
Fuente: SOLIDWORKS.

Para un grado de calidez visual y presentación de las formas, se presentó un equilibrio en numero 2 ya que si se aumenta no se podrá visualizar bien y creará conflictos al momento de simular, para que sea claro y muy detallado, al mismo tiempo no se carga tanto al procesador de la computadora.

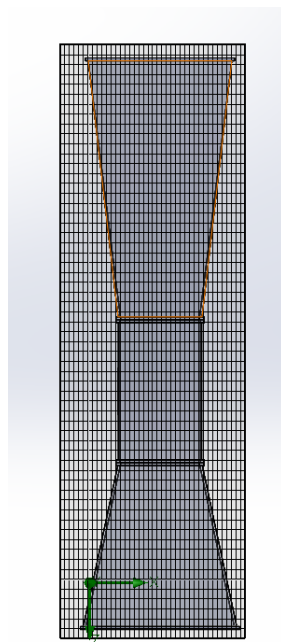
Figura 18. Display del refinamiento mallado.



Elaborado por: Erik Romero
Fuente: SOLIDWORKS.

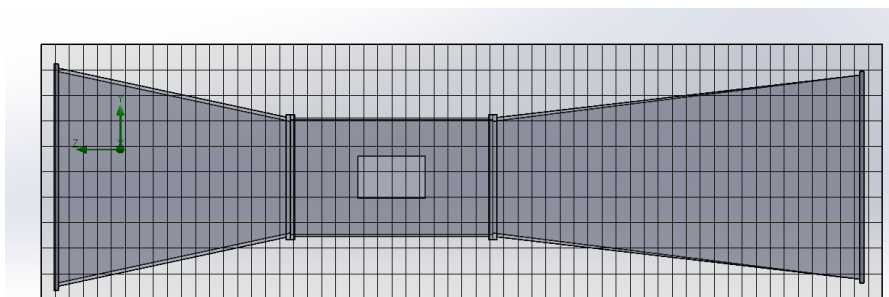
Para finalizar, se presentará el mallado manual y como se ve aplicado en el túnel de viento, como se dijo antes, la geometría no es tan compleja, para así realizar un análisis del flujo de viento.

Figura 19. Vista superior del mallado



Elaborado por: Erik Romero
Fuente: SOLIDWORKS.

Figura 20. Vista lateral del mallado

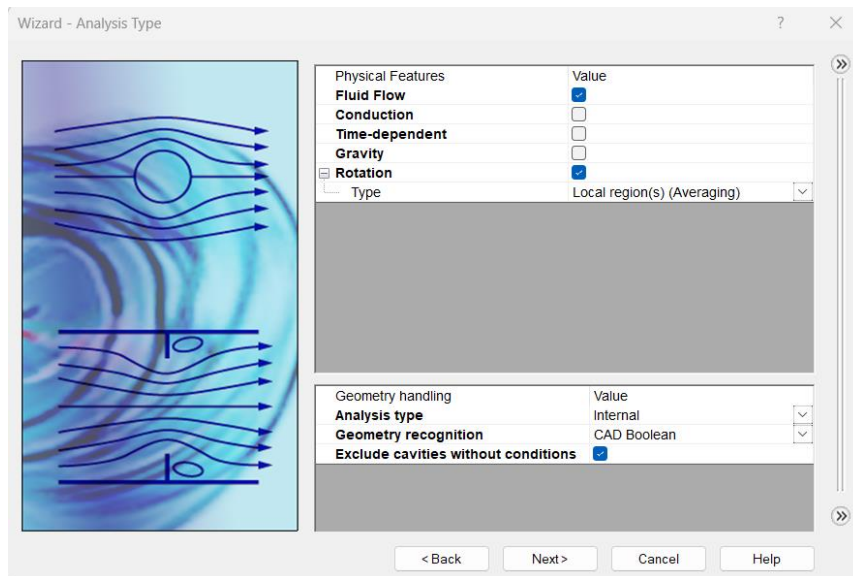


Elaborado por: Erik Romero
Fuente: SOLIDWORKS.

Se realizó unas pruebas de simulación con la ayuda del CDF, dónde se necesitan los valores previamente calculados, para proporcionar valores de entrada y salida del túnel de viento. En la parte de Flow Simulation, se busca wizard y se colocan los datos que, solicitados, la primera ventana muestra en las unidades que se trabajará que van a ser las internacionales. Luego la siguiente ventana se activa lo más importante que es la opción **Fluid Flow** porque se analiza el movimiento del aire dentro del túnel y la rotación, para luego colocar el aerogenerador de baja potencia y así realizar el análisis interno, porque el enfoque de estudio será dentro del túnel de

viento. Como influye el moviendo del aire en el aerogenerador, la parte de CAD boolean para que reconocer las partes geométricas de cada estructura estudiada.

Figura 21. Análisis de los fluidos

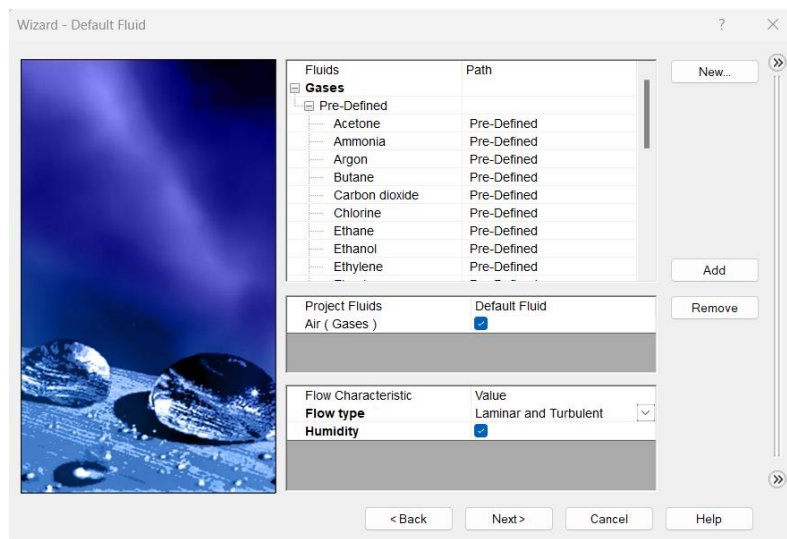


Elaborado por: Erik Romero

Fuente: SOLIDWORKS.

En la siguiente ventana, se elige el tipo de fluido que se desea seleccionar el Aire que circule dentro del túnel, en el tipo de fluido para laminar y turbulento para que se asemeje lo más real, donde unas partes del túnel de viento, el aire va circular de forma laminar y directa y en otras va a ser turbulento. Activar la casilla de la humedad para representar las condiciones más reales posibles de la atmósfera de la ciudad.

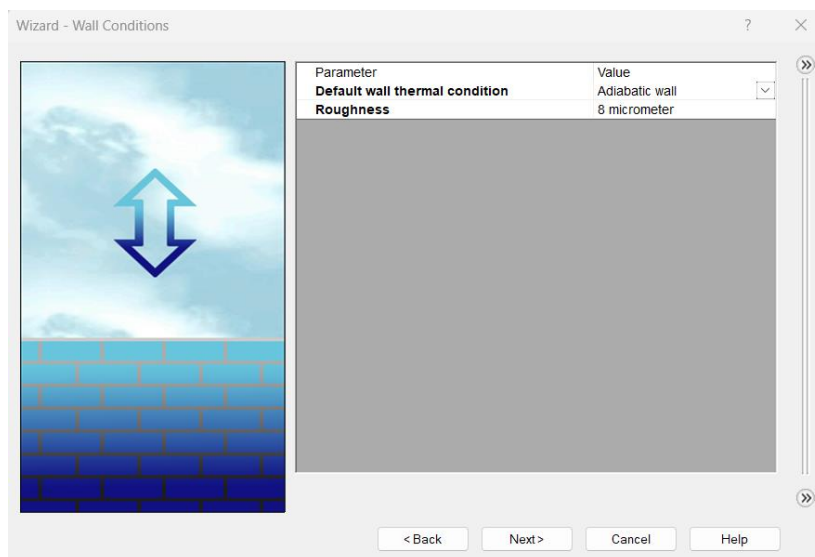
Figura 22. Selección de fluidos



Elaborado por: Erik Romero
Fuente: SOLIDWORKS.

A continuación, se solicita la información sobre las paredes, si a existir fricción o no, se elige Adiabatic wall para analizar los fluidos y no de calor o térmica, luego pide el dato de rugosidad, en este caso para realizar la simulación, se trabajará con acero y una pintura industrial que se asemeje lo más real, se aplican valores de 5 – 8 micrómetros, consultando para una fabricación futura se encontró con acero de 5 micrómetros lo cual después de pintarlo quedaría en los 8 a 10 micrómetros con una sola capa de pintura.

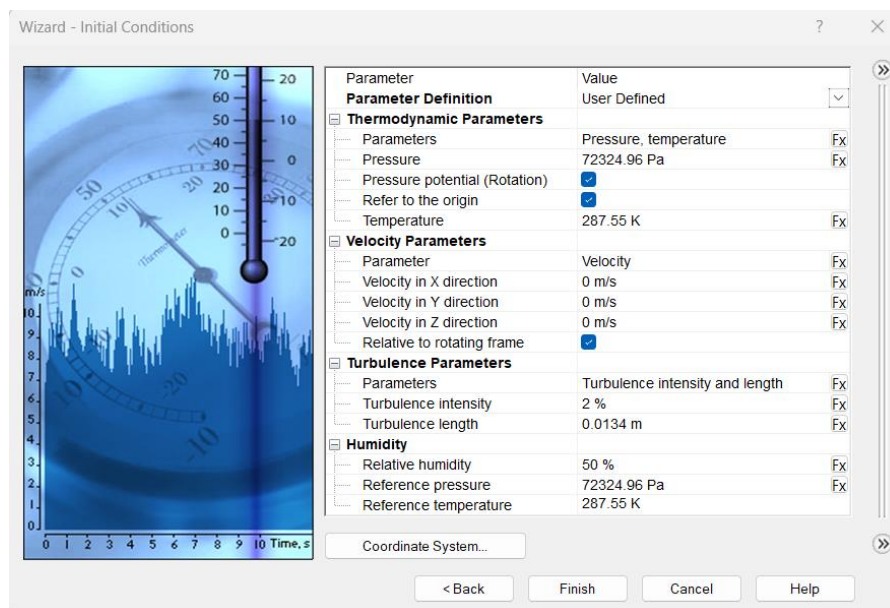
Figura 23. Rugosidad de las paredes



Elaborado por: Erik Romero
Fuente: SOLIDWORKS.

En la siguiente ventana, es una de las más importantes, aquí se coloca los parámetros de la ciudad de Riobamba, como la presión, temperatura, se inserta una promedia porque para analizar la velocidad, también se explica cómo se especificó la turbulencia, la humedad se inserta un promedio con relación a los datos de la ciudad de Riobamba ya que estos varían entre un 40% y 70 %. La velocidad va después en Boundary Conditions porque se va a trabajar con algunas velocidades. Y se finaliza la parte de wizard para comenzar con las Boundary Conditions (condiciones de contorno).

Figura 24. Condiciones iniciales

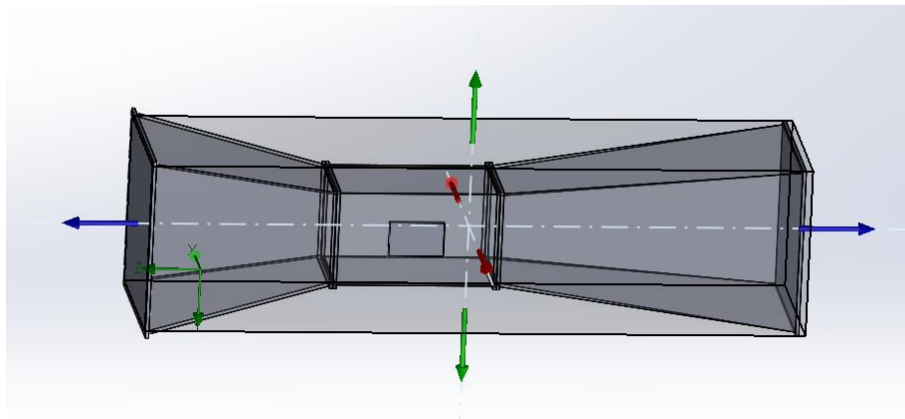


Elaborado por: Erik Romero

Fuente: SOLIDWORKS.

Al momento que cargue se ve que Enel túnel de viento se carga el dominio computacional y este marcado toda la zona que interesa, por donde va circular el aire, también muestra que está abierto y que necesita como lar como tapas, que solo sirve al momento de simular y que calcule como circular por adentro del túnel. Si se desea se puede mover el dominio, pero para estudio solo lo se aplica en la parte interna.

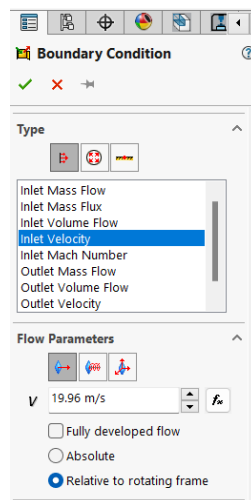
Figura 25. Vista delantera del túnel



Elaborado por: Erik Romero
Fuente: SOLIDWORKS.

Se definen las condiciones de contorno, que es una parte muy importante, ya que se coloca la dirección o trayectoria del viento, se colocó en la entrada la velocidad que fue calcula de 19,96 m/s, como solo es una prueba para ver el funcionamiento del túnel de viento solo se colocara una velocidad.

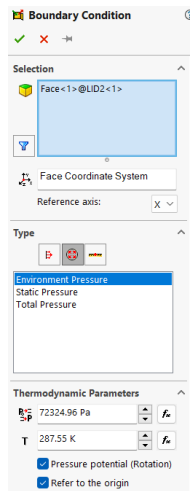
Figura 26. Condiciones de límite o de borde de entrada.



Elaborado por: Erik Romero
Fuente: SOLIDWORKS.

Luego se coloca en la parte de salida del túnel de viento en las condiciones de contorno o de borde, la presión que fue calculada y la temperatura de la ciudad de Riobamba.

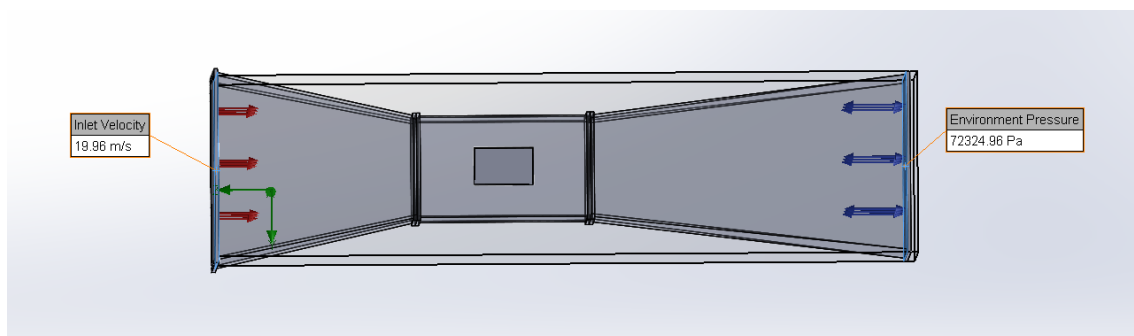
Figura 27. Condiciones de límite o de borde de salida.



Elaborado por: Erik Romero
Fuente: SOLIDWORKS.

Queda de la siguiente manera, donde las flechas de color rojo representan la velocidad y las de color azul la presión, si por algún motivo en tan en dirección contraria, el software permite cambiar la orientación, en este caso está muy bien y se puede continuar.

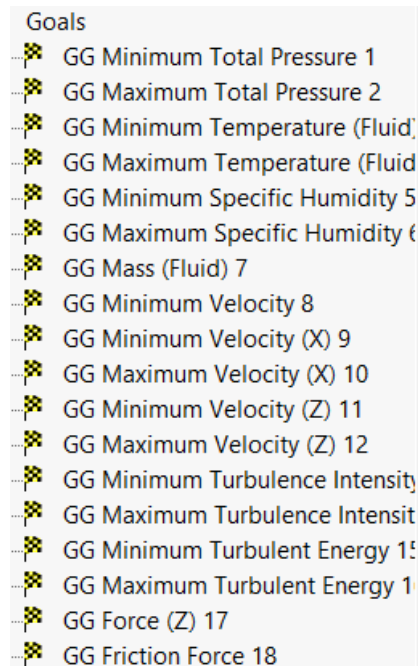
Figura 28. Condiciones de contorno o de borde del túnel de viento.



Elaborado por: Erik Romero
Fuente: SOLIDWORKS.

En este punto de análisis en el túnel de viento va a ser la zona de pruebas, aquí es donde se realiza las pruebas con el aerogenerador tornillo de Arquímedes, y se observa cómo afecta la velocidad del viento, la temperatura y la humedad, y así analizar y recolectar los datos. Para eso, se debe definir los puntos globales, en el árbol de diseño se busca el apartado goals, colocando todos los puntos antes mencionados para que el software realice los cálculos necesarios y así obtener los datos.

Figura 29. Puntos globales a estudiar.

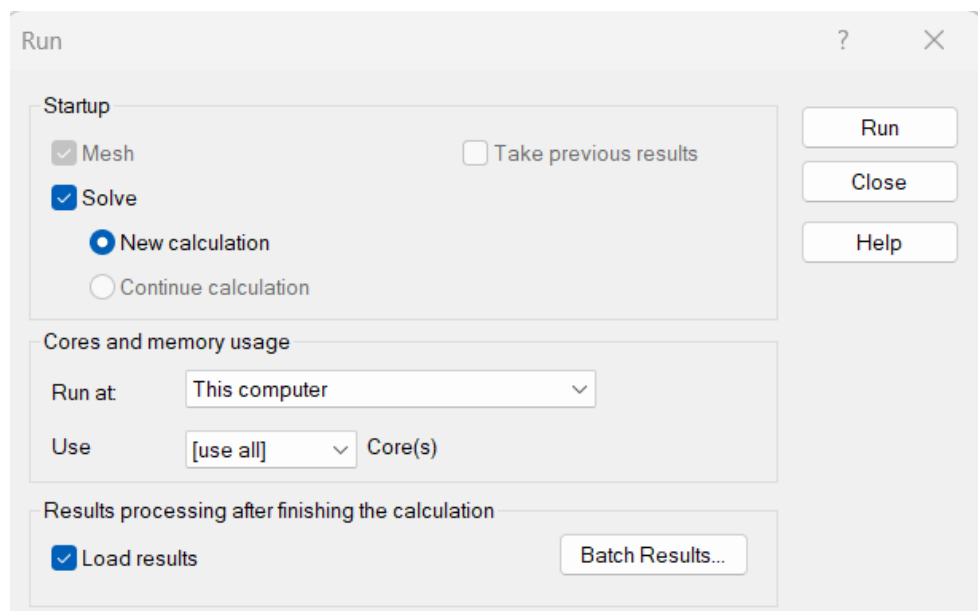


Elaborado por: Erik Romero

Fuente: SOLIDWORKS.

Se empieza con la simulación en el botón Run, aquí el software realizara el análisis de los parámetros de la ciudad de Riobamba, los mallados y dominio, entrega las simulaciones para ver cómo funciona el túnel de viento, realizara los cálculos, el mallado de forma automática.

Figura 30. Ventana de ejecución.



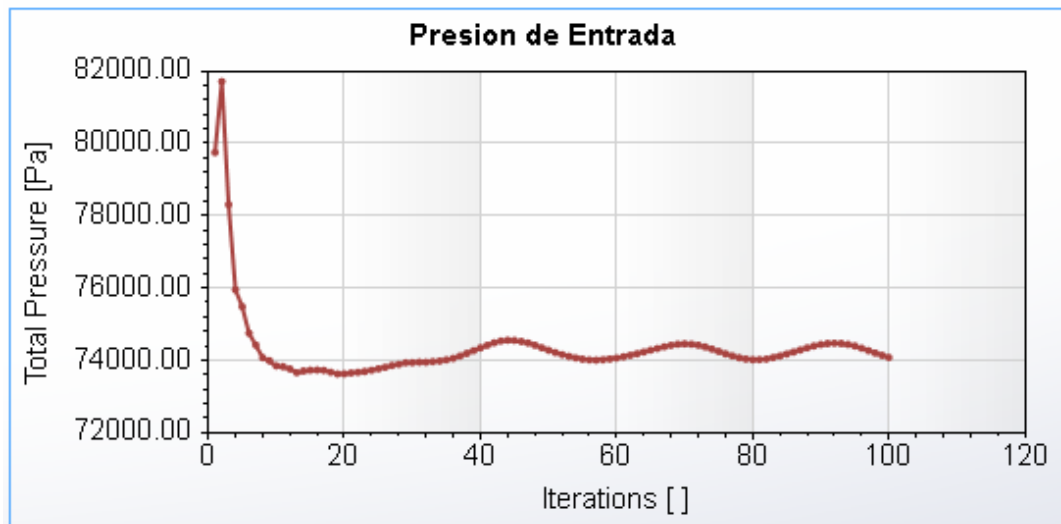
Elaborado por: Erik Romero

Fuente: SOLIDWORKS.

Resultados de la simulación

Muestra los resultados, los cuales se expresan en una gráfica donde se muestra en la parte interior del túnel de viento que tiene la misma presión, la velocidad es constante como la temperatura, se mostrará cada una.

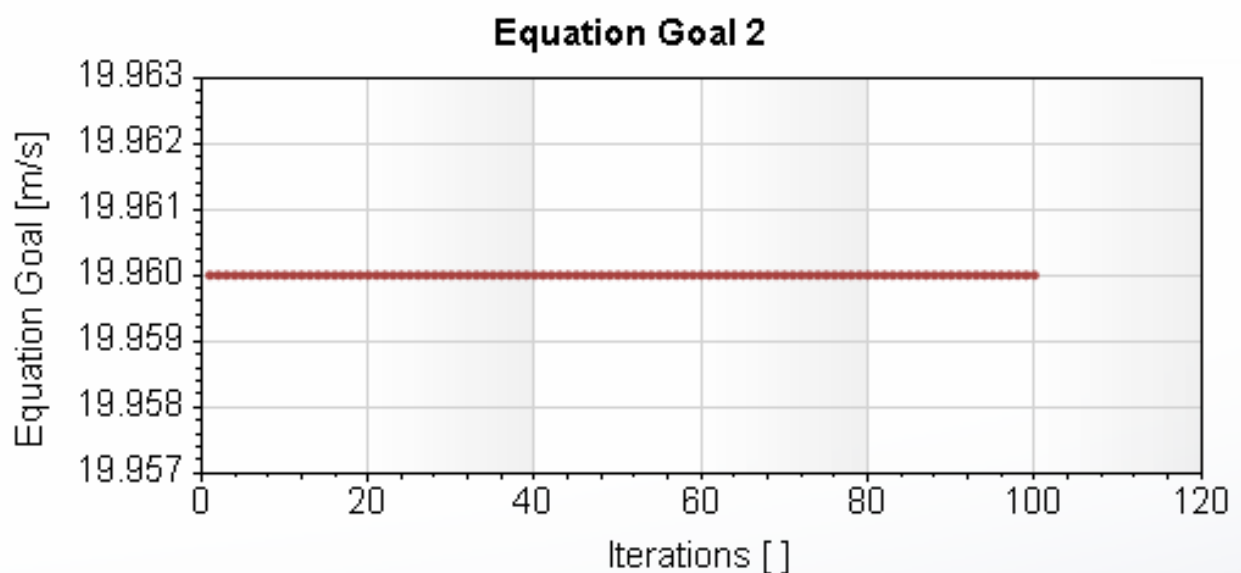
Figura 31. Presión de entrada.



Elaborado por: Erik Romero

Fuente: SOLIDWORKS.

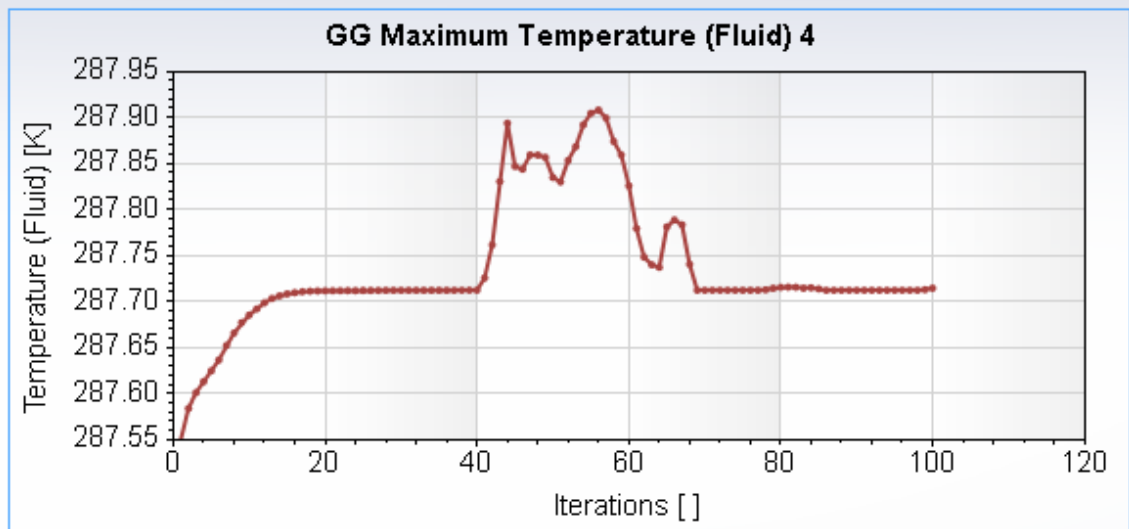
Figura 32. Velocidad.



Elaborado por: Erik Romero

Fuente: SOLIDWORKS.

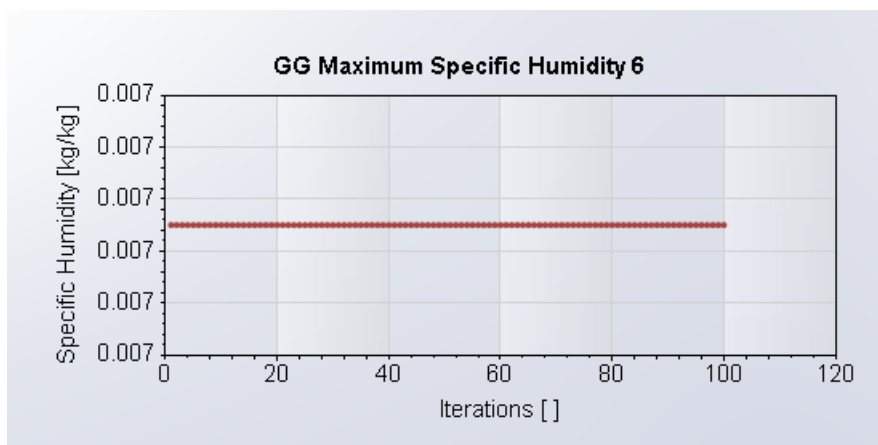
Figura 33. Temperatura máxima.



Elaborado por: Erik Romero

Fuente: SOLIDWORKS.

Figura 34. Humedad.

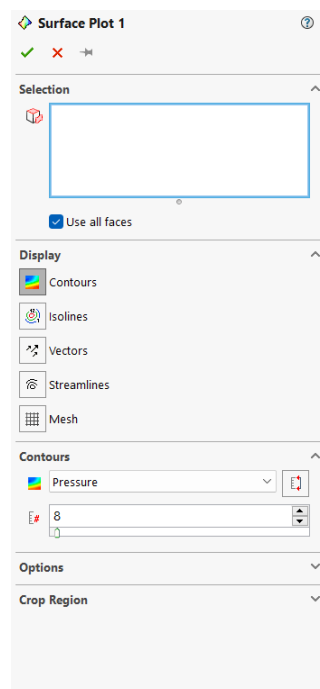


Elaborado por: Erik Romero

Fuente: SOLIDWORKS.

Para ver cómo afecta la presión dentro del túnel de viento, en la parte de resultados se inserta un Surface Plot, donde muestra con colores como afecta la presión dentro del túnel de viento, se observa en la zona de prueba es la presión atmosférica de la ciudad de Riobamba y en la entrada, en el contractar la presión es mayor, por lo que desde aquí sopla el viento.

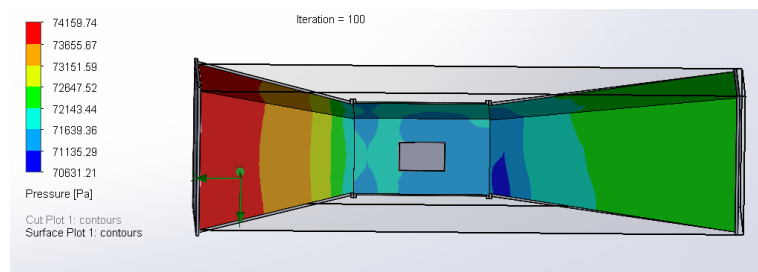
Figura 35. Ventana Surface Plot.



Elaborado por: Erik Romero

Fuente: SOLIDWORKS.

Figura 36. Mapeado de la presión dentro del túnel de viento.

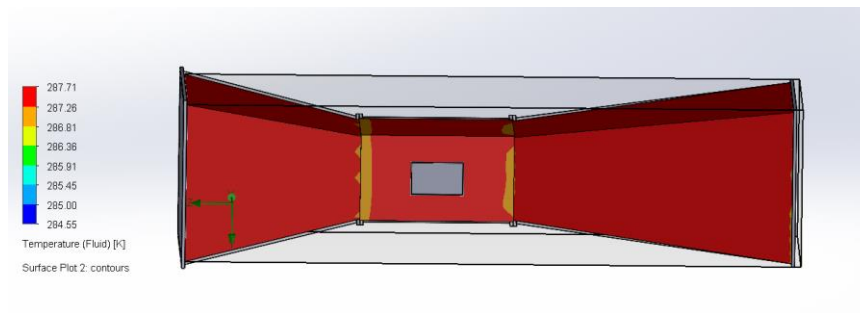


Elaborado por: Erik Romero

Fuente: SOLIDWORKS.

También se realizó lo mismo para la temperatura, velocidad del viento y la humedad, para que no exista cruces se aplicó uno para cada uno. En el caso de la temperatura muestra que esta entre los 287,70 K (14,56° C) que es lo que colocho y está trabajando correctamente.

Figura 37. Mapeada temperatura dentro del túnel de viento.

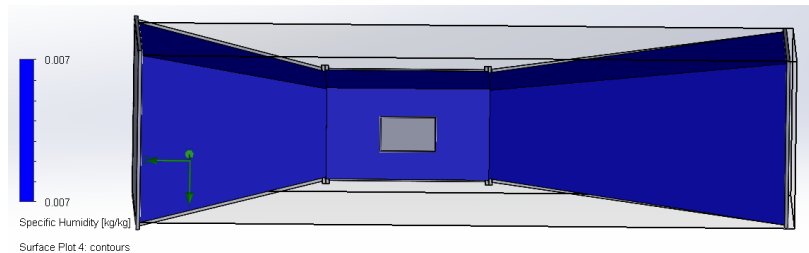


Elaborado por: Erik Romero

Fuente: SOLIDWORKS.

En el caso de la humedad se observa que no es muy elevado y no afecta mucho al interior del túnel de viento.

Figura 38. Mapeada humedad dentro del túnel de viento.

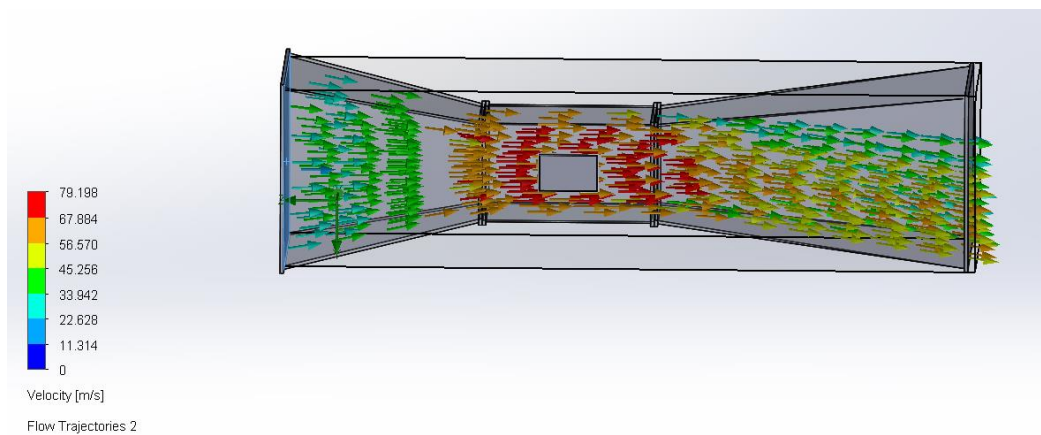


Elaborado por: Erik Romero

Fuente: SOLIDWORKS.

En la siguiente imagen, se usa Flow Trayectories para la velocidad del viento, para observar cómo se mueve en el plano con la ayuda de las flechas, se puede observar que comienza desde el ventilador axial, pasa por el panel enderezador de flujo, zona de pruebas y termina el difusor donde la velocidad ya disminuye.

Figura 39. Simulación de la velocidad del viento.

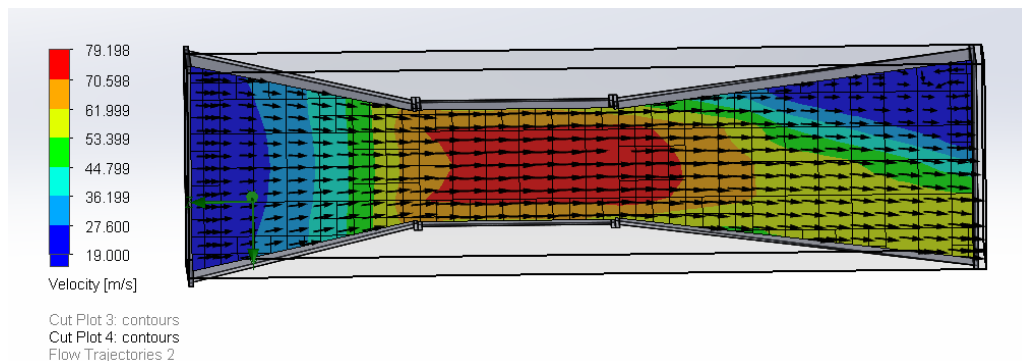


Elaborado por: Erik Romero

Fuente: SOLIDWORKS.

Para un análisis un poco más profundo, en la parte de Cut Plots, se usó el mapeado de vectores de la velocidad, donde se visualiza la dirección del viento, como en la zona de pruebas esta la mayor velocidad y en difusor ya va disminuyendo consecutivamente.

Figura 40. Mapa de vectores de la velocidad.

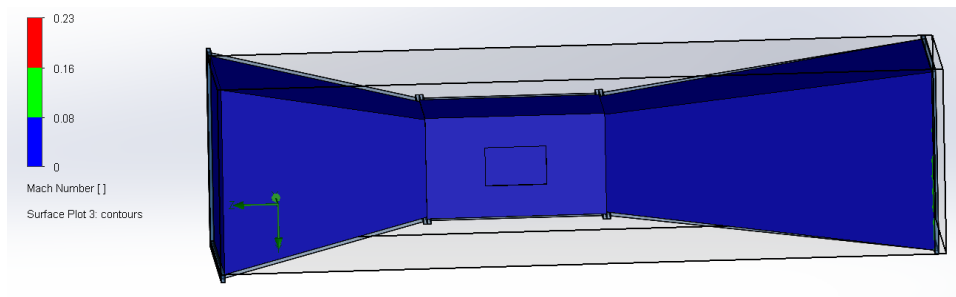


Elaborado por: Erik Romero

Fuente: SOLIDWORKS.

En el caso de los numero de mach, se identifica que está en el rango que se calculó anteriormente de los 0,03 a los 0,06, el túnel de viento se encuentra de color azul que muestra el rango y confirma que es un túnel de viento subsónico.

Figura 41. Número de Mach.



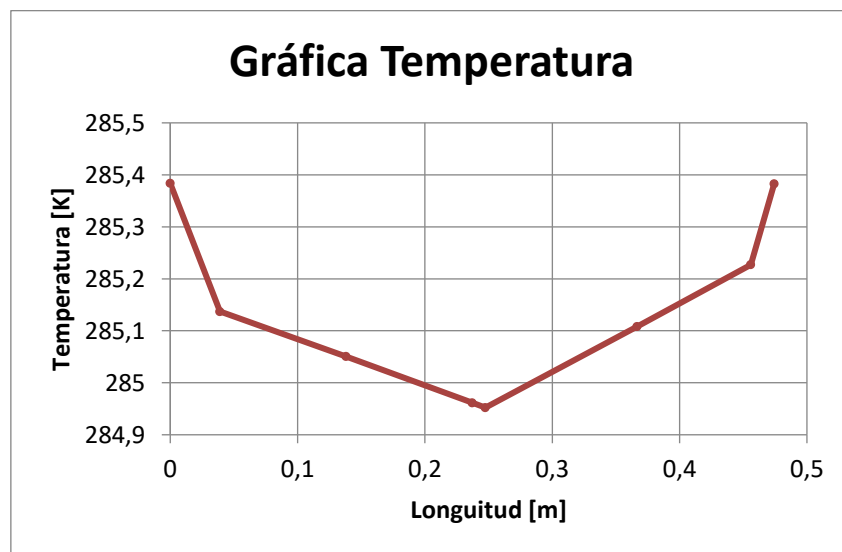
Elaborado por: Erik Romero
Fuente: SOLIDWORKS.

Graficas de perfiles

Se analizó los perfiles con la ayuda del apartado XY Plots de las simulaciones, específicamente de la zona de pruebas de la parte del medio al final, los parámetros que se tomaron en cuenta para el estudio van a ser la temperatura, presión, humedad relativa, velocidad y los números de mach.

En el perfil de temperatura que empieza por debajo de los 285.40 K (12.25° C) y baja hasta llegar a los 284.95 (11.8° C), esto debido a la velocidad del viento aumenta en la zona de pruebas en una sola dirección, generando poca fricción. Al final de la zona de pruebas vuelve a subir la temperatura debido a que ya existe un poco más de fricción al momento de entrar en el difusor, aquí la velocidad del viento disminuye y el viento ya no va solo a una dirección.

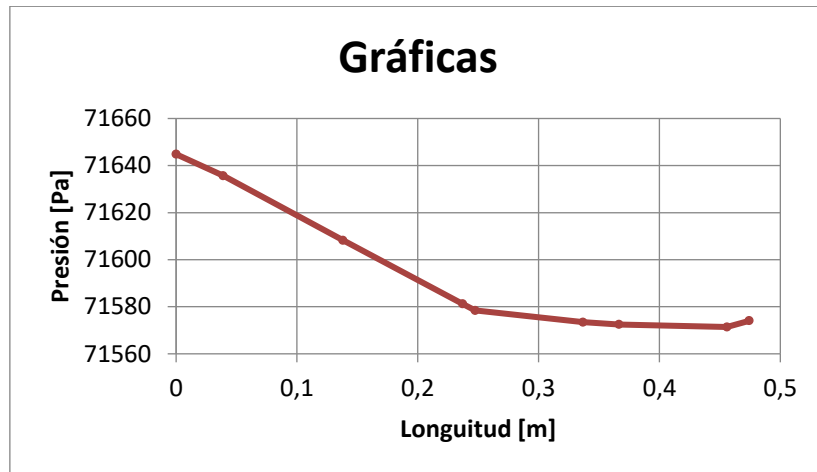
Figura 42. Perfil de Temperatura



Elaborado por: Erik Romero
Fuente: SPSS 2.5.

El perfil de la presión se observa tal cual a la entrada a la zona de pruebas entras con más presión y desciende un poco de 71,640 Pa baja a 71,570 Pa, luego sube un poco, esto por la pérdida de fricción que existe y que aumenta la velocidad del aire en la zona de pruebas. Al final existe una pequeña subida de la presión debido a la expansión del flujo.

Figura 43. Perfil de presión.

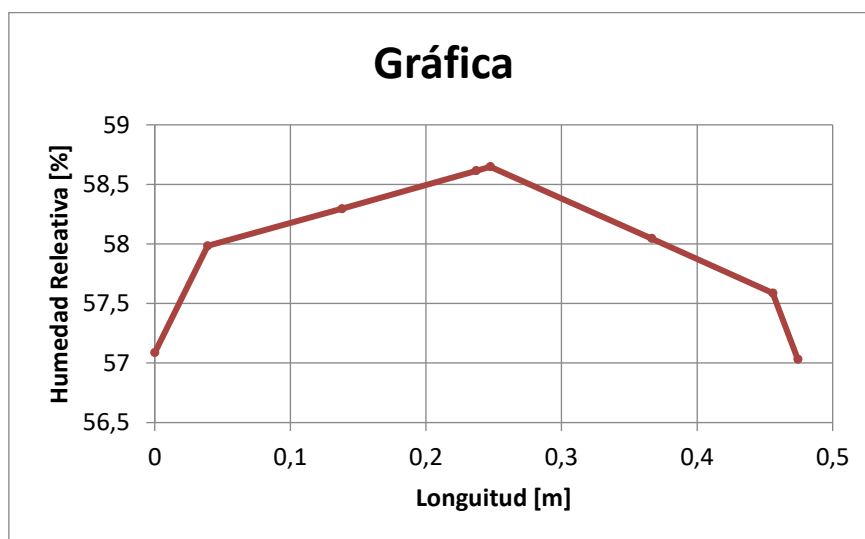


Elaborado por: Erik Romero

Fuente: SPSS 2.5.

El perfil de humedad relativa muestra que hay un poco incremento de 57 a 58.8 en la zona de pruebas, este asociado al cambio de temperatura que existe bajando un poco debido a que el aire atrae más al vapor del agua y esto provoca que baje la temperatura, en la parte de la salida de la zona de pruebas, la humedad relativa vuelve como estaba al inicio, aumentando un poco.

Figura 44. Perfil de la humedad relativa.

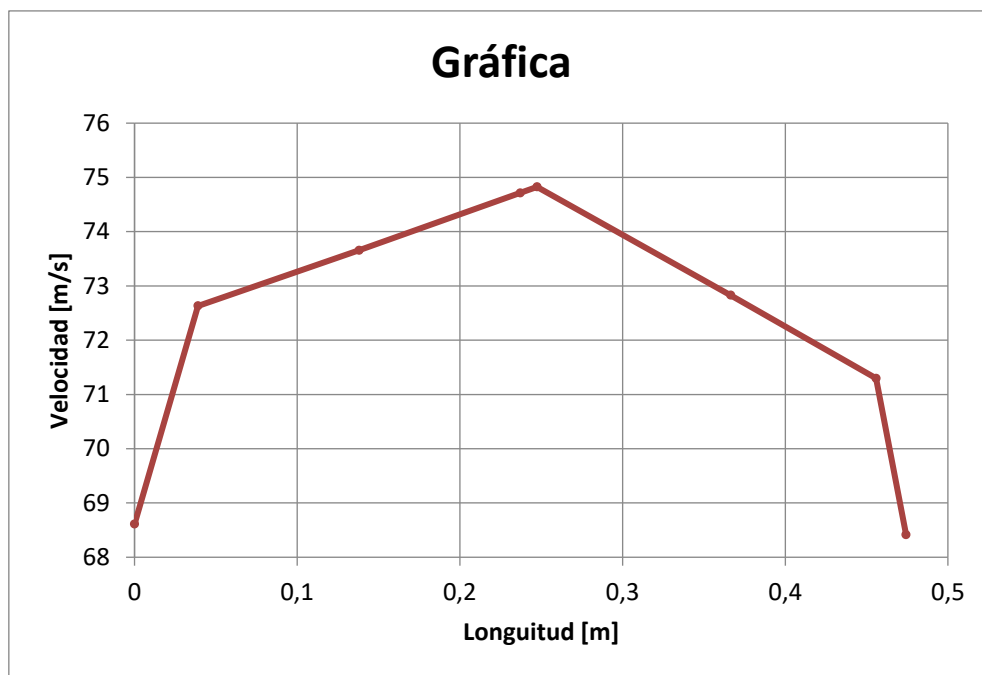


Elaborado por: Erik Romero

Fuente: SPSS 2.5.

El perfil de velocidad, que comienza con una velocidad de un poco más de 68 m/s, en la primera parte, donde recién comienza a entrar el aire comenzando la aceleración, en la parte intermedia llega a su máxima velocidad que es de menos de 75 m/s, aquí ya está estabilizado gracias a la ayuda geométrica del túnel de viento, más estabilidad del flujo con menos perturbaciones, esta zona es la óptima para las pruebas que se realizaran a los aerogeneradores, en la parte final ya disminuye la velocidad, aquí donde comienza a expandirse por estar conectado al difusor, el aire ya se dispersa a diferentes direcciones.

Figura 45. Perfil de velocidad.

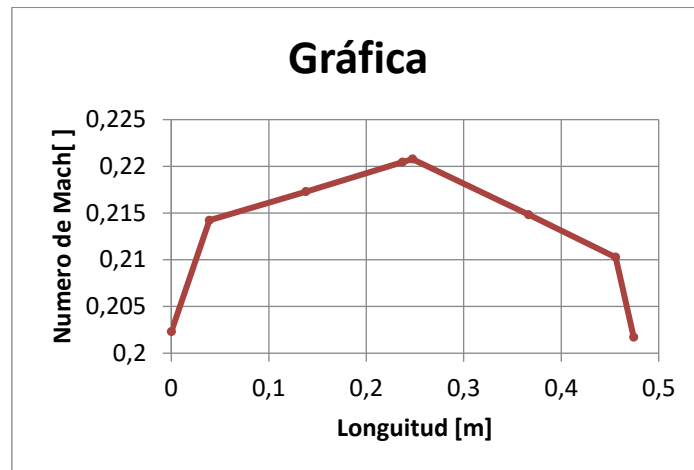


Elaborado por: Erik Romero

Fuente: SPSS 2.5.

En el perfil de número de Mach, que llega un poco más de 0,20, muestra que es subsónico que se calculó, ideal para el estudio de aerogeneradores de baja potencia. Dado que va de la mano con la velocidad, el número de Mach aumenta por la aceleración del flujo que existe en el inicio de la zona de pruebas, en la mitad de la gráfica o parte central, donde es más estable ideal para realizar los estudios de los aerogeneradores, al final de la gráfica va disminuyendo el número de Mach porque la velocidad del flujo igual disminuye y se esparce de poco en poco al difusor.

Figura 46. Número de Mach



Elaborado por: Erik Romero

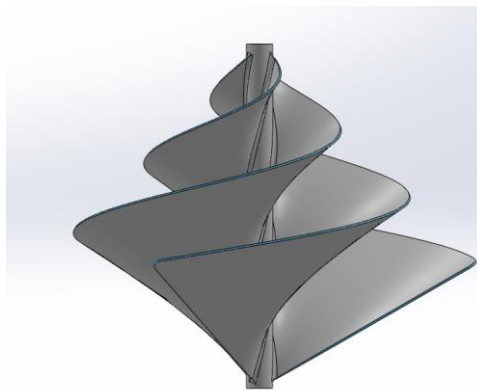
Fuente: SPSS 2.5.

Una vez probado el túnel de viento y verificado la funcionalidad a través de las simulaciones que se obtuvieron con las gráficas, se continúa con el diseño del tornillo de Arquímedes el cual al momento de diseñarlo se probó dentro del túnel y así ver cuanta potencia genera.

Dimensionamiento de aerogenerador tipo tornillo de Arquímedes

En este apartado se hablará del diseño y modelamiento tridimensional del rotor tipo tornillo de Arquímedes, comenzando desde un eje cilíndrico, luego una trayectoria helicoidal (Helix/Spiral), definiendo el número de vueltas según la longitud. Continuando, con la creación de las aspas, se aplicó un barrido (Sweep) para la forma geométrica helicoidal. Para el conjunto de aspas, que en este caso de estudio va ser de 3 aspas, se replicó el modelo circular obteniendo la configuración final del rotor integrándose con el eje.

Figura 47. Vista del rotor tipo tornillo de Arquímedes hecho en SolidWorks.

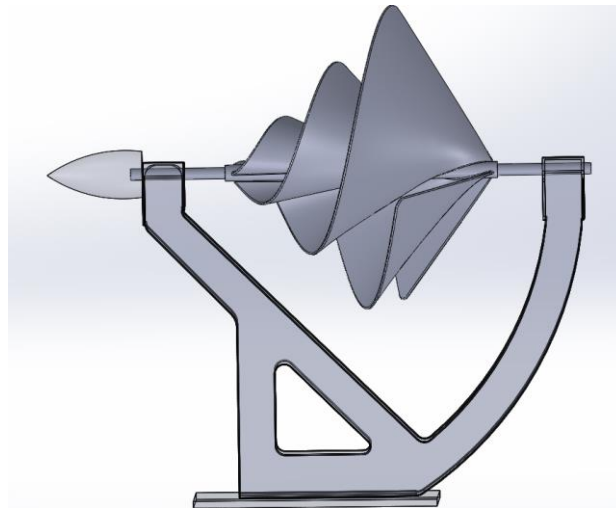


Elaborado por: Erik Romero

Fuente: SOLIDWORKS.

Para la toma de datos sea estable y lo más real posible dentro de la simulación, se le agrego una base al aerogenerador, que permite que este un punto fijo, cuenta con una varilla o un eje cilíndrico de punta a punta interna, que no impide que gire, una base estándar, así se puede tomar los datos internos en la zona de pruebas del túnel de viento, tal y como se muestra a continuación en la siguiente figura:

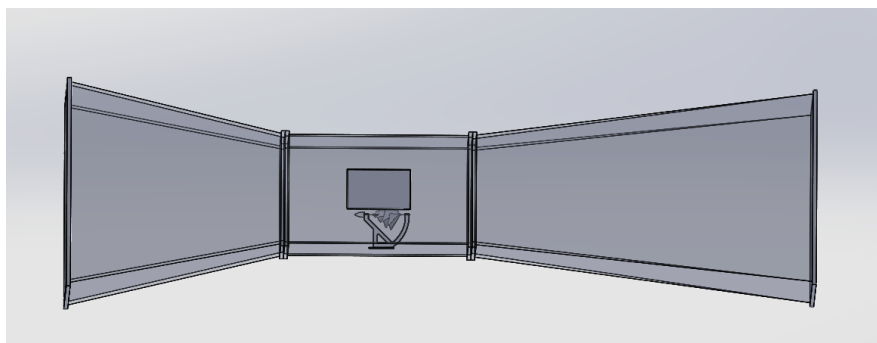
Figura 48. Aerogenerador tornillo de Arquímedes con su base.



Elaborado por: Erik Romero
Fuente: SOLIDWORKS.

Luego de finalizar el diseño del aerogenerador tipo tornillo de Arquímedes, se colocó dentro de la zona de pruebas del túnel del viento con la parte como se muestra en la figura de a continuación:

Figura 49. Vista del aerogenerador Tornillo de Arquímedes dentro del túnel de viento.

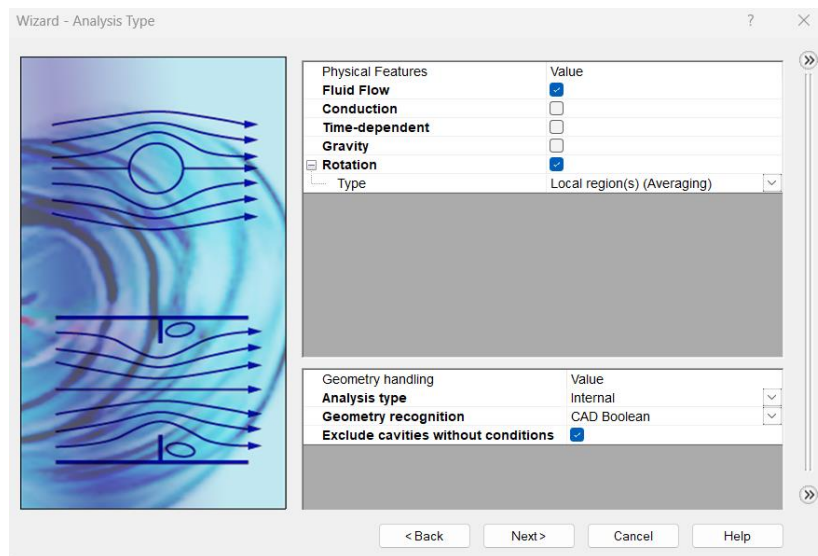


Elaborado por: Erik Romero
Fuente: SOLIDWORKS.

Con estos datos se puede calcular la potencia mecánica, la potencia eléctrica y el voltaje que produce el aerogenerador tornillo de Arquímedes. Todo colocado correctamente, ahora en el apartado de wizard, las 2 primeras ventanas son iguales a las que se identificaron con la

simulación del túnel de viento anteriormente, se elige la opción de rotación (Regions), es necesario porque analiza estacionariamente el flujo de aire y el rotor del aerogenerador que se encuentra dentro del túnel de viento, se explicó que solo el rotor gira, que el Torque (N.m) se genere en esa parte del aerogenerador. El CFD de software SolidWorks crea un cilindro de rotación alrededor del aerogenerador tornillo de Arquímedes, los demás dominios quedan estáticos.

Figura 50. Ventana de Tipo de análisis.



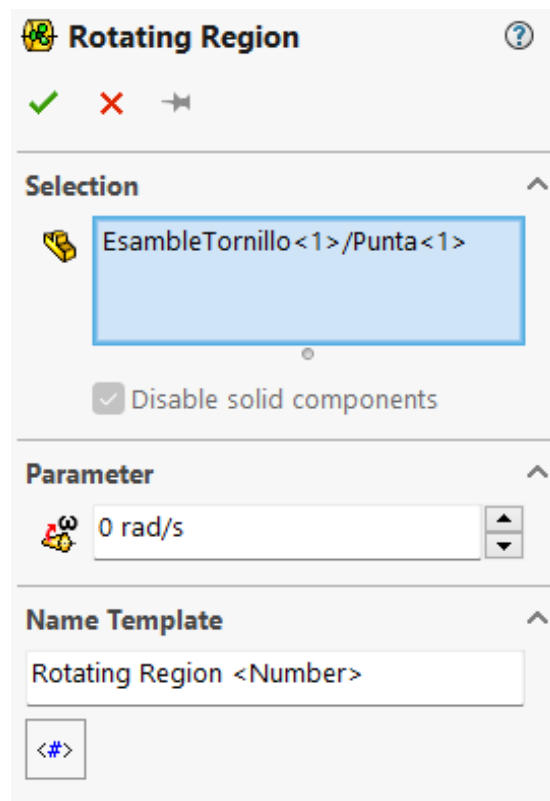
Elaborado por: Erik Romero

Fuente: SOLIDWORKS.

La siguiente venta corresponde a la misma, se elige el aire, movimiento laminar y turbulento para que sea lo más real posible, también se habilitó la humedad. En la siguiente ventana en las condiciones de pared, de la misma manera con una rugosidad superficial de $8 \mu\text{m}$ debido al material y la pintura del túnel de viento. En la ventana final, se aplican los mismos datos, la presión, la temperatura y velocidad que luego se cambió, la única ventana importante en este caso fue la de Analysis Type.

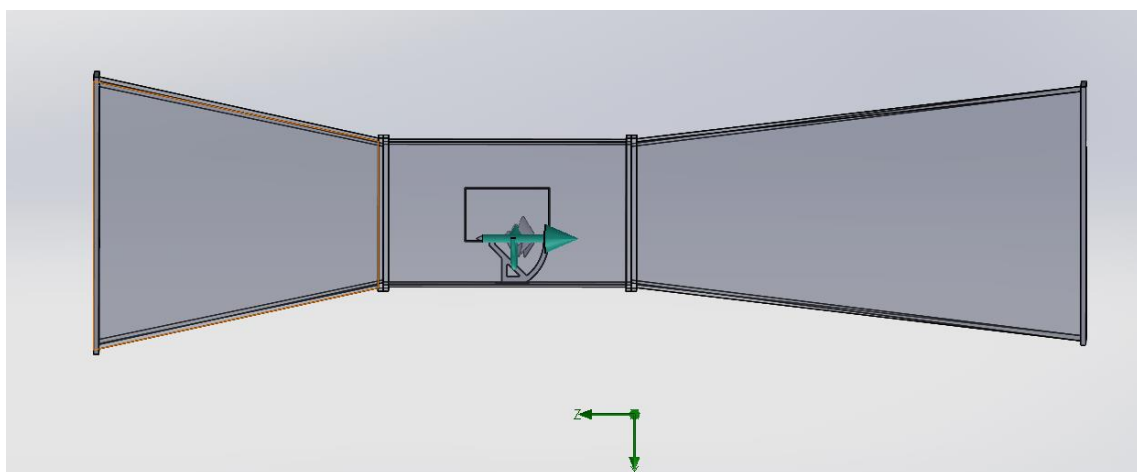
Se coloca Rotation en el apartado de Flow Simulation, y en Rotating Region, con eso se activa la región de rotación la cual solo se aplica en el aerogenerador tornillo de Arquímedes, se debe tener cuidado de no colocar a ninguna pared del túnel de viento o existirá problemas al momento de realizar los cálculos, se aplica Boundary Conditions que serán la velocidad de entra. El eje de rotación ideal es Axial o eje de rotor, el tipo de fluido va a ser cilíndrico. el cual cubrirá toda la parte del aerogenerador, también se colocó la velocidad angular y después en la parte de cálculos, la cual es de 60 a 120 rad/s para aerogeneradores de baja potencia.

Figura 51. Colocación de la rotación en el aerogenerador.



Elaborado por: Erik Romero
Fuente: SOLIDWORKS.

Figura 52. Vista de donde se coloca la rotación.

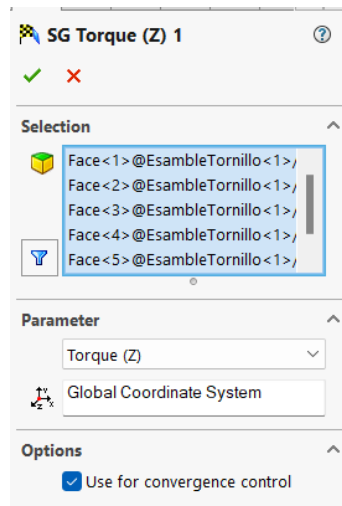


Elaborado por: Erik Romero
Fuente: SOLIDWORKS.

Aquí se define donde calcular el Torque (N.m), en Flow Simulation, el apartado de Goals seleccionando la opción de medición de Torque, el software solo analiza las partes que se

habilitan en el aerogenerador tornillo de Arquímedes, los parámetros de estudio van a ser las diferentes velocidades del flujo de viento y las temperaturas de la ciudad de Riobamba.

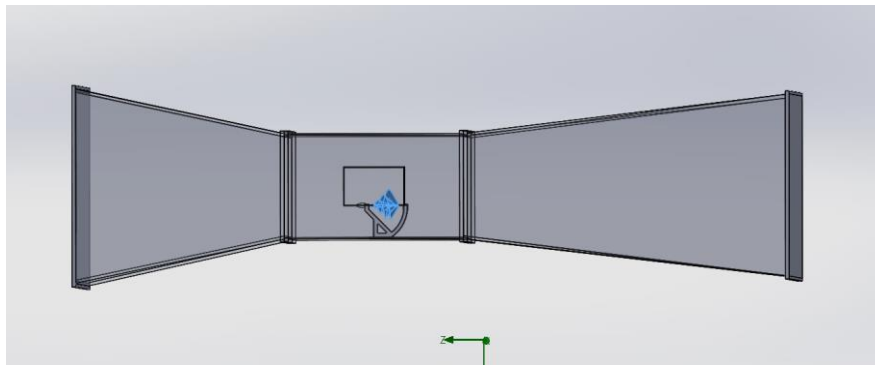
Figura 53. Colocación de la medición del Torque en el aerogenerador.



Elaborado por: Erik Romero
Fuente: SOLIDWORKS.

En la imagen de continuación se observa la parte resalta de las aspas del aerogenerador que reciben directamente el flujo del aire, aquí es donde el CFD realizara las mediciones necesarias para poder obtener el torque.

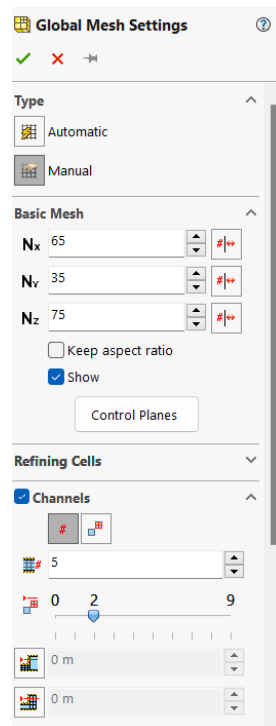
Figura 54. Vista de las aspas seleccionadas del aerogenerador.



Elaborado por: Erik Romero
Fuente: SOLIDWORKS.

Para que los datos sean seguros y estables, se colocó un mallado, en la parte de Flow Simulation, vemos Mesh, haciendo uso del manual para asegurar una resolución muy adecuada en la región de rotación del aerogenerador.

Figura 55. Mallado global del túnel de viento.

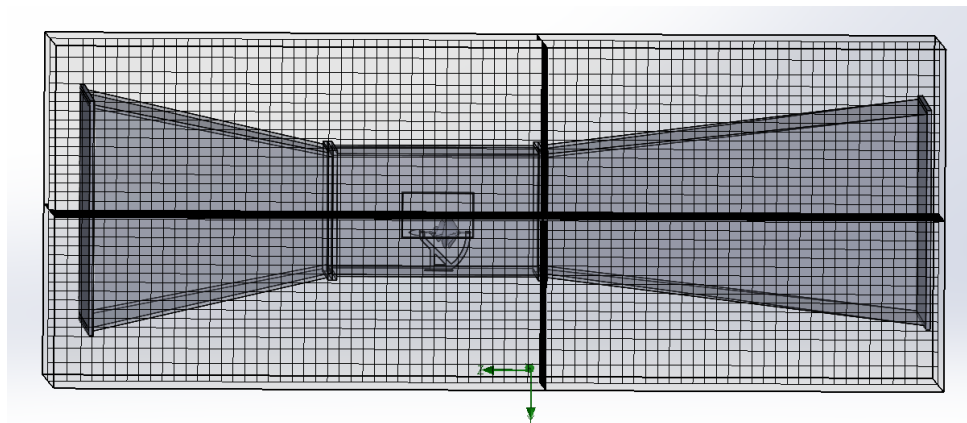


Elaborado por: Erik Romero

Fuente: SOLIDWORKS.

Y el mallado se observa como se muestra en la siguiente figura:

Figura 56. Vista del mallado global del túnel de viento.



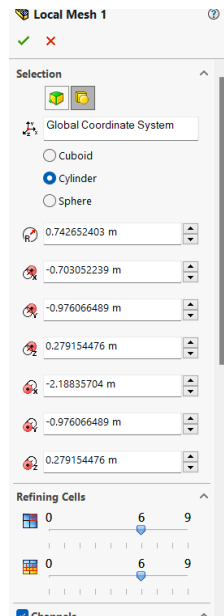
Elaborado por: Erik Romero

Fuente: SOLIDWORKS.

Para ver datos un poco más precisos y confiables, se hizo un mallado local, en la parte de Flow Simulation, aplicando Local Mesh, la parte de región genera un cilindro justo en la zona que va a rotar el aerogenerador, donde se generan los gradientes de la presión y velocidad. Activando la casilla de channel para que detecte los sitios específicos del túnel, estrechamientos y las zonas

de flujo, donde aplica un refinamiento para que el flujo resuelva de mejor manera sin hacerlo de forma manual. Se activa la casilla de cilindro para que la rotación siga la geometría de la región rotatoria rodeando uniformemente el rotor.

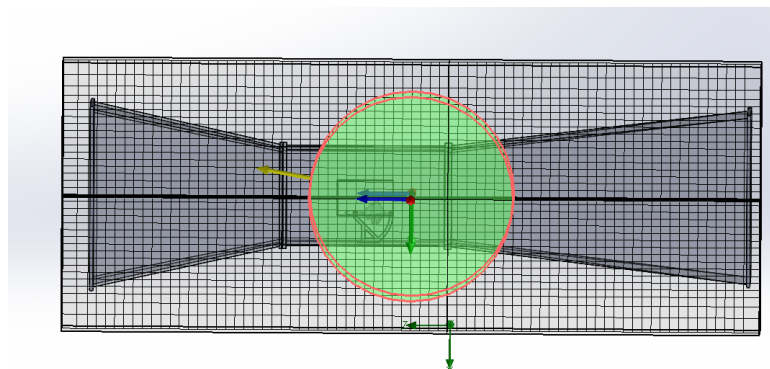
Figura 57. Mallado local del aerogenerador.



Elaborado por: Erik Romero
Fuente: SOLIDWORKS.

Quedando de la siguiente manera:

Figura 58. Vista del mallado local del aerogenerador.



Elaborado por: Erik Romero
Fuente: SOLIDWORKS.

Se usaron diferentes variables como velocidades del flujo de viento, velocidad angular del rotor del aerogenerador sobre el torque y temperatura, por lo cual se usa el estudio paramétrico (Parametric Study) del CFD del software que permite evaluar de una forma sistemática, aquí se

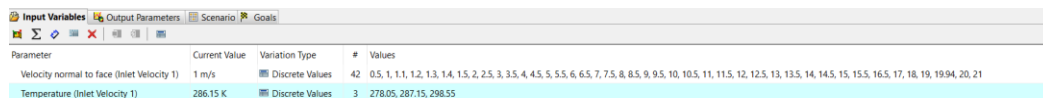
aplica las diferentes velocidades del flujo de viento y la temperatura que se trabajará en baja (278,05K), media (287,15K) y alta (298,55K).

El software hará una simulación con cada una de las combinaciones en la geometría del aerogenerador dentro del túnel de viento, realizando una simulación, pero corriendo muchos casos a la vez y obteniendo el diseño experimental con las condiciones controladas.

Es necesario tener las variables de entrada bien definidas con la temperatura, velocidad del flujo de aire y la velocidad angular (ω). Para la salida (Outputs) va a ser el torque.

En la parte de simulación, se da clic derecho y aparece new Parametric study, posterior a ello se presenta una ventana en la parte inferior, aquí se coloca las variables de entrada y salida como se muestra en las siguientes figuras:

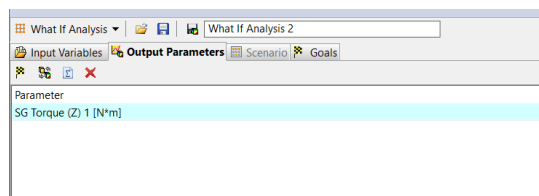
Figura 59. Ventana de las variables de entrada.



Parameter	Current Value	Variation Type	#	Values
Velocity normal to face (Inlet Velocity 1)	1 m/s	Discrete Values	42	0.5, 1, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5, 6, 6.5, 7, 7.5, 8, 8.5, 9, 9.5, 10, 10.5, 11, 11.5, 12, 12.5, 13, 13.5, 14, 14.5, 15, 15.5, 16.5, 17, 18, 19, 19.94, 20, 21
Temperature (Inlet Velocity 1)	286.15 K	Discrete Values	3	278.05, 287.15, 298.55

Elaborado por: Erik Romero
Fuente: SOLIDWORKS.

Figura 60. Ventana de variables de salida.



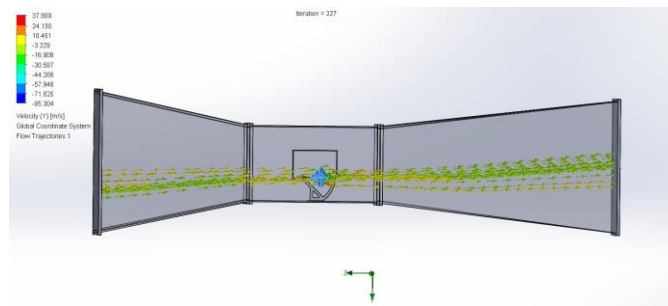
Parameter
SG Torque (Z) 1 [N*m]

Elaborado por: Erik Romero
Fuente: SOLIDWORKS.

Resultados de la simulación

Se observa con la ayuda de las flechas cómo va el flujo del viento desde el inicio del ventilador axial y pasa por el aerogenerador. Observando una redistribución del campo de velocidad que lo causa la interacción de las aspas del aerogenerador, aquí se generan zonas de aceleración asociadas al cambio de la energía cinética.

Figura 61. Simulación de la trayectoria del viento.

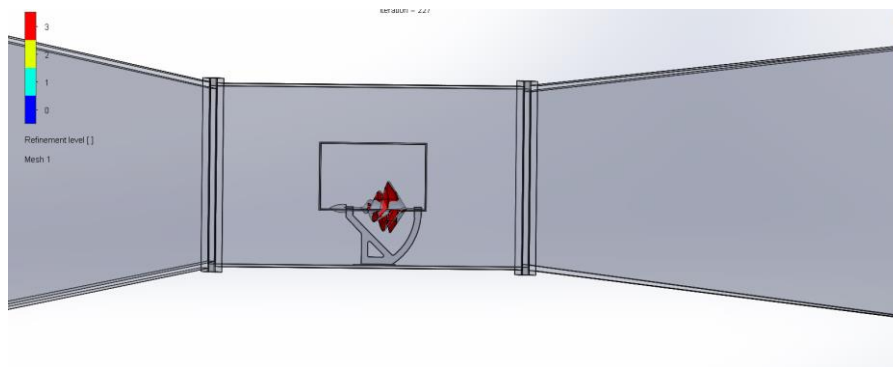


Elaborado por: Erik Romero

Fuente: SOLIDWORKS.

En la siguiente figura, se observa el mallado (mesh) que generan las aspas del aerogenerador, el color rojo (3) indica mallado fino y detallado para el cálculo, también las gradientes de velocidad, cambios de presión, la interacción del flujo del aire con la geometría o diseño del aerogenerador.

Figura 62. Mallado en el aerogenerador.

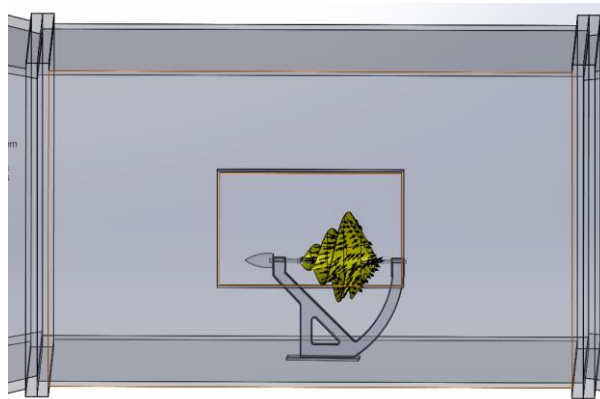


Elaborado por: Erik Romero

Fuente: SOLIDWORKS.

En la siguiente figura, se observa el flujo de aire inicia de forma uniforme sobre el aerogenerador, siendo favorable la interacción aerodinámica controlada y representando las condiciones de operación. También, muestra la forma correcta del dominio delimitando el fluido y la región de rotación que contribuye a una estimación precisa del torque y del desempeño energético del sistema.

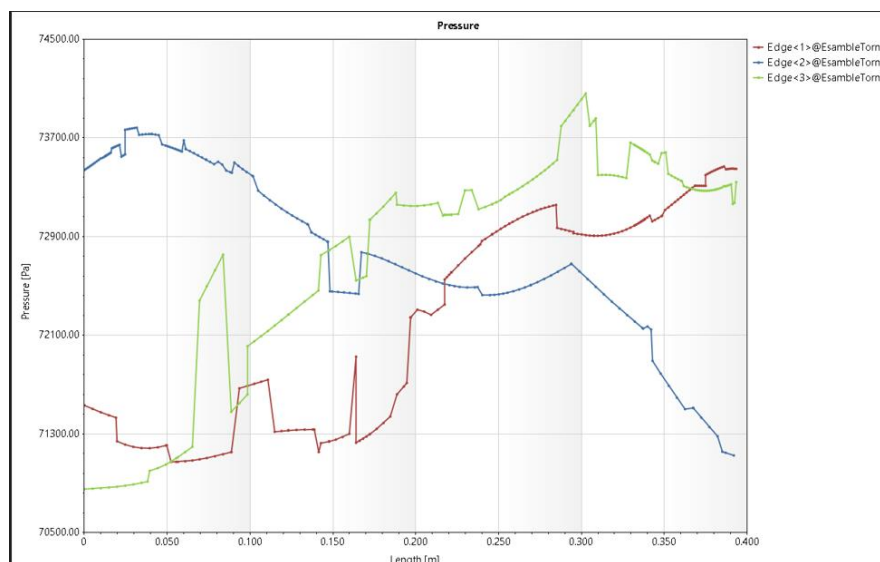
Figura 63. Distribución del flujo en el aerogenerador.



Elaborado por: Erik Romero
Fuente: SOLIDWORKS.

En la siguiente figura, se observa como la presión afecta al aerogenerador, donde en una de las aspas, la de color azul disminuye la presión en la zona de entrada, debido a las pérdidas aerodinámicas iniciales, al contrario de la verde que va de subida y la roja que disminuye un poco pero después comienza a subir, esto debido a las variaciones que hay entre el flujo del aire y el rotor, también por el cambio de la energía cinética del aire a energía mecánica. Al final del túnel, la presión comienza a estabilizarse.

Figura 64. Presión en el aerogenerador.



Elaborado por: Erik Romero
Fuente: SOLIDWORKS.

El torque que se obtuvo gracias al CFD, que fueron calculadas mediante las fuerzas aerodinámicas que ejercieron en el flujo del viento sobre las aspas del aerogenerador tipo tornillo de Arquímedes, obteniendo los datos que representan un comportamiento del rotor bajo

variables controladas de velocidad de flujo de aire y temperatura, que son corresponden a la ciudad de Riobamba. Se exportan los datos resultantes para hacer los cálculos respectivos y obtener la potencia gracias a la ecuación:

$$P = T \cdot \omega$$

Donde:

P = potencia mecánica (w)

T= torque (N.m)

ω = velocidad angular del rotor (rad/s)

Se convirtió la velocidad angular del rotor de revoluciones por minuto (RPM) a radianes por segundo (rad/s) mediante la ecuación:

$$\omega = \frac{2\pi \cdot \text{RPM}}{60}$$

$$\omega = 6,283 \text{ rad/s}$$

El cual se empleó para obtener la potencia mecánica, donde se ocupó los 60 rad/s por ser el rango típico en los aerogeneradores de baja potencia de pequeña escala, que están diseñados para un flujo de aire controlado que va a ser dentro del túnel de viento. También para no forzar el rotor, permite la opción de comparar en diferentes condiciones o escenarios de trabajo, así poder reducir variables innecesarias y realizar comparaciones en diferentes casos.

Con esto, se verificó el aumento de la potencia dependiendo solo del torque, el cual funciona con la relación directa de la velocidad del flujo del aire y de la geometría del rotor.

Permitiendo cuantificar de una manera directa la capacidad del aerogenerador para transformar la energía cinética del flujo del aire en energía mecánica. donde un aumento del torque produce un aumento de potencia, teniendo en cuenta la velocidad angular se mantenga o aumente.

En la siguiente tabla se muestra cómo se obtuvo el torque, mediante las 2 variables que se ocuparon y estas son: la temperatura y la velocidad y para entender cada una de ellas, se utilizó el Parametric Studies.

Tabla 5. Torque

Temperatura	Velocidad	Torque
287.15	0.5	0.00275718
287.15	1	0.01082933
287.15	1.1	0.01239863
287.15	1.2	0.01489663
287.15	1.3	0.0174927
287.15	1.4	0.02200669
287.15	1.5	0.02113995
287.15	2	0.04130835
287.15	2.5	0.06771629
287.15	3	0.09069829
287.15	4	0.17001409

Elaborado por: Erik Romero

Fuente: SOLIDWORKS.

Discusión

En la siguiente parte analizó los resultados de forma completa que se obtuvieron durante las simulaciones en el software SolidWorks, mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) y analizando estadísticamente los datos finales. Con el objetivo de evaluar el rendimiento energético, la correcta verificación de los datos obtenidos y la verificación con el modelo estadístico aplicado.

En el siguiente parte se utilizó un análisis estadístico para evaluar el rendimiento energético. Se realizó un análisis descriptivo con los datos obtenidos del CFD, el cual ahí que detallar que el software brinda el torque (N.m), como se explicó en la parte de arriba gracias a la fórmula se logró alcanzar a la potencia, lo cual se analizó y revisó la relación con la velocidad y la temperatura como se indica en la siguiente tabla.

Tabla 6. Datos obtenidos del torque

Torque (N.m)	
Mínimo	0,00261650
Primer Cuartil (Q1)	0,0213767793
Mediana	0,3304043605
Media	1,1963149605
Tercer Cuartil (Q3)	2,1863991635
Máximo	4,68398285
Asimetría	1,182

Elaborado por: Erik Romero

Fuente: SOLIDWORKS.

Como primera parte está los análisis descriptivos, una variable que servirá mucho para conocer que es el Torque.

En la tabla, hay valores que están en un rango de 0,0026165 y 4,68398285, la media (1,1963149605) y la mediana (0,3304043605) mostrando una diferencia entre los dos. Esta discrepancia, alado del coeficiente de asimetría positivo (1,182), muestra una distribución inclinada hacia la derecha, por la existencia de valores altos de torque cuando el flujo de viento es elevado, el rango intercuartílico del torque, que está entre el Q1 (0,021376) y el Q3 (2,186399) indican que esta el 50% se concentran los datos en el intervalo respectivamente acotado.

Después de haber calculado el torque también se desea analizar la potencia que genera, que se obtuvo con los cálculos y se representan en la siguiente tabla. Con respecto a la Potencia, muestra un rango de 0,01578234 y 28,25311894, la media (1,19631) y la media (1,99295) mostrando una diferencia mínima, representando una asimetría positiva, por la influencia de valores de baja potencia. El rango intercuartílico entre Q1 (0,12894169) y Q3 (13,188049055), demuestra que la mayor parte de las observaciones están en valores bajos y medios de la potencia y los valores elevados corresponden a mayores velocidades del flujo de viento.

Tabla 7. Datos obtenidos del torque

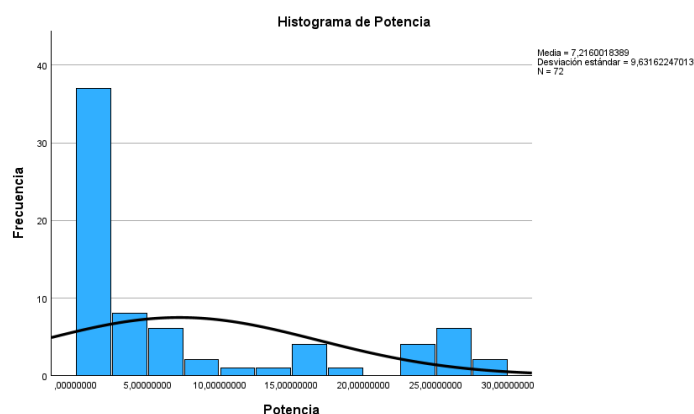
Potencia	
Mínimo	0,01578234
Primer Cuartil (Q1)	0,12894169
Mediana	1,9929521510
Media	7,216001870
Tercer Cuartil (Q3)	13,188049055
Máximo	28,25311894
Asimetría	1,182

Elaborado por: Erik Romero

Fuente: SOLIDWORKS.

A continuación, se muestra una figura del histograma de la potencia, el cual se identifica las potencias bajas casi cercanas a 0 y valores pequeños y pocos valores altos en menor frecuencia, mostrando una distribución no normal y asimétrica positiva, se muestra que el aerogenerador trabaja a bajas potencias y que solo llega a las altas potencias cuando es mayor la velocidad del flujo.

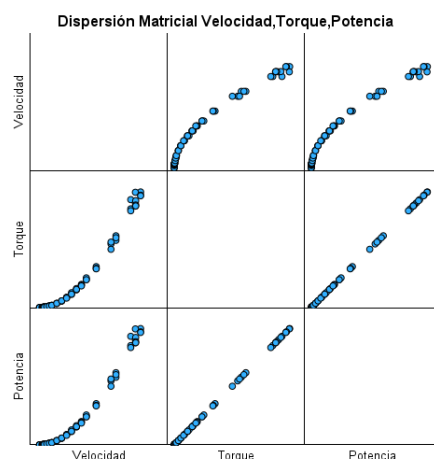
Figura 65. Histograma de la potencia



A continuación, en la siguiente figura de la dispersión matricial de velocidad, Torque y velocidad, entre la velocidad y torque existe una relación creciente no lineal en bajas temperaturas y el torque en aumento latente y aumentando la velocidad el torque es más pronunciado. Entre la velocidad y la potencia, se puede observar que mientras más de velocidad la potencia aumenta existiendo una relación no lineal, sino de forma acelerada. Entre la potencia

y el torque, existe una relación casi lineal, siguiendo una tendencia clara sin dispersión significativa.

Figura 66. Dispersión Matricial Velocidad - Torque - Potencia



Elaborado por: Erik Romero
Fuente: SOLIDWORKS.

En la siguiente tabla representa la matriz de correlación de Pearson, las variables utilizadas fueron velocidad, Torque y voltaje. Se observa una correlación positiva fuerte entre la velocidad y el voltaje (0,999), también entre velocidad y torque (0,973) y entre el torque y voltaje (0,971). Resultaron muy significativamente ($p < 0,0001$) confirmando la interdependencia entre las variables.

Figura 67. Tabla de correlación.

Correlaciones				
		Velocidad	Torque	Voltaje
Velocidad		1	0,973	0,999
Torque		0,973	1	0,971
Voltaje		0,999	0,971	1

Elaborado por: Erik Romero
Fuente: SOLIDWORKS.

Las simulaciones que se realizamos se obtuvieron en el Torque entre el flujo del aire con el rotor, luego llegar a la velocidad angular (RPM), se calcula la potencia mecánica obteniendo una estimación directa, la cual después convertir a potencia eléctrica y al final obtener el voltaje que genera, teniendo en cuenta las diferentes velocidades del flujo del aire. En un enfoque estadístico, se aplican modelos de regresión y análisis descriptivos con el fin de cuantificar la velocidad del flujo sobre el torque y la potencia obtenida. Los datos obtenidos relacionan

estadísticamente significativas con el comportamiento físico del sistema. La siguiente tabla indica el modelo de los datos de cada variable dependiente. El modelo permitió representar adecuadamente el comportamiento energético del aerogenerador, sin embargo, con el análisis estadístico mostro que los residuos no siguen una distribución normal perfecta. Este resultado no invalida el modelo, porque refleja comportamientos reales del sistema bajo condiciones de operación no ideales.

Tabla 8. Parámetros obtenidos del modelo regresión lineal

PARAMETROS OBTENIDOS DEL MODELO REGRESION LINEAL					
1. Modelos	<i>Potencia = $\beta_0 + \beta_1 \cdot V$</i>				
2. Residuos	Mínimo	1er Cuartil	Mediana	3er cuartil	Máximo
	-3,505	-2,2899	0,58269	1,7244	4,7156
3. Error Residual Estándar	2,22000144				
4. R	0,973				
5. R cuadrado Múltiple	0,948				
6. R cuadrado ajustado	0,947				
7. Estadístico F	1266,444				
8. Valor P	<0,001				

Elaborado por: Erik Romero

Fuente: SOLIDWORKS.

En la primera parte habla del modelo de regresión lineal propuesto ayudo a analizar la variable es la potencia y su relacionada con la velocidad del flujo del aire. En el análisis de residuos se puede ver una muestra media cercana a 0 y una mediana 0,5826, indicando ausencia de sesgos sistemático. Se mantiene en un rango razonables los valores mínimo y máximo de los residuos, demostrando una asimetría baja, la dispersión sugiere que el ajuste lineal no captura por completo la variabilidad del fenómeno. Se va a realizar una evaluación de modelo cuadrático. El error residual estándar (2,2220) representa el error promedio de predicción de la potencia y en relación con el rango total de los datos es un resultado razonable.

El coeficiente de correlación múltiple ($R=0,973$) muestra una relación fuerte entre la velocidad y la potencia. Así mismo, el coeficiente de determinación $R^2=0,948$ existe una aproximadamente de 94,8% de la variedad de potencia, que da un resultado muy satisfactorio viéndolo desde un punto de vista estadístico y físico. El R^2 ajustado (0,947) confirma un modelo no sobre ajustado, manteniendo su capacidad explicativa considerando el tamaño de la muestra.

Por último, el estadístico F (1266,444) que está elevado, alado del valor de significancia menor a 0,001, dice que el modelo es estadístico significativo y que la relación entre la velocidad del flujo de aire y la potencia no es azar.

Tabla 9. Parámetros obtenidos del modelo regresión lineal cuadrática

PARAMETROS OBTENIDOS DEL MODELO REGRESION LINEAL CUADRATICA					
1. Modelos	$Potencia = \beta_0 + \beta_1 \cdot V + \beta_2 \cdot V^2$				
2. Residuos	Mínimo	1er Cuartil	Mediana	3er cuartil	Máximo
	-1,2146	-0,1840	0,0093	0,9878	2,84721
3. Error Residual Estándar	0,5876825				
4. R	0,998				
5. R cuadrado Múltiple	0,996				
6. R cuadrado ajustado	0,996				
7. Estadístico F	9500,960				
8. Valor P	<0,001				

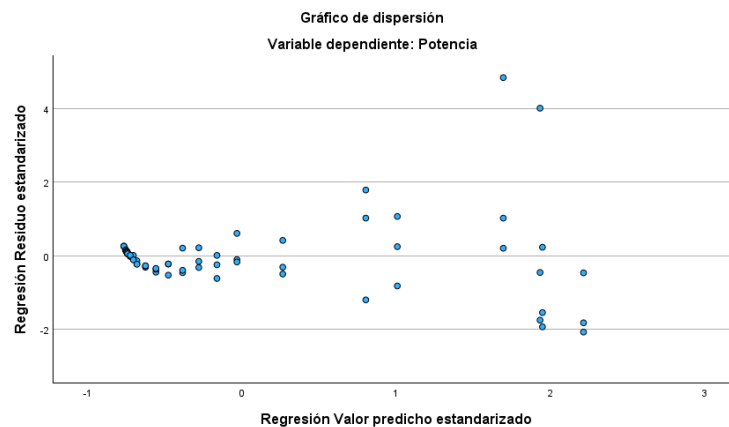
Elaborado por: Erik Romero

Fuente: SOLIDWORKS.

El modelo cuadrático representa los resultados más adecuados del rendimiento energético del aerogenerador. Una estabilidad de los residuos entre la velocidad del flujo de aire y la potencia. El error residual (0,5876) es mucho menor que el modelo lineal, el modelo reduce la dispersión del error. El coeficiente de correlación ($R=0,998$) aumenta un poco comparado con el modelo lineal, refleja una relación muy fuerte entre la velocidad y la potencia. El R^2 y R^2 ajustado (0,996) equivale al 99,6% de la variabilidad de la potencia y R^2 ajustado no disminuye, confirmando que el término V^2 aporta información real y no ruido. El estadístico F (9500,960) y $p < 0,001$, indica un modelo global significativo, validando su respaldo estadístico.

Para la validez del modelo ajustado, analice el comportamiento de los residuos mediante la gráfica de residuos estandarizados frente los valores predichos estandarizados representado en la figura. La dispersión aleatoria de los puntos alrededor del eje horizontal muestra la ausencia de patrones sistemáticos. Confirmando un ajuste adecuado del modelo y respalda el modelo cuadrático para poder mostrar el comportamiento de la potencia en función a la velocidad.

Figura 68. Grafica de Dispersión.

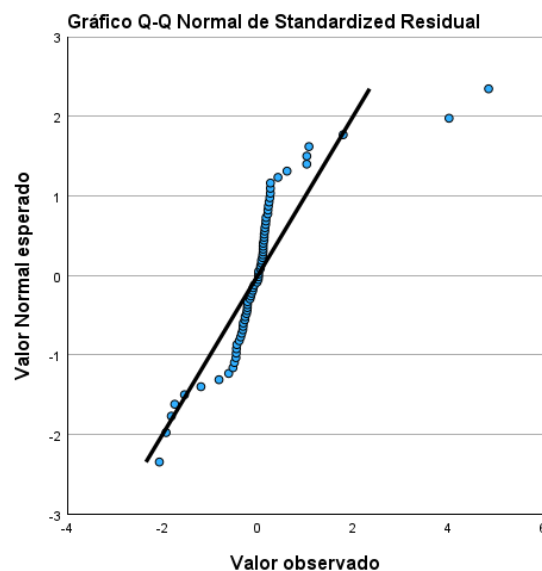


Elaborado por: Erik Romero

Fuente: SPSS 2.5.

En la siguiente figura, representa la gráfica Q-Q normal de residuos estandarizados mostrando la mayor parte de puntos están alineados con la recta de normalidad, más los de la central de la distribución. También se observa pocas desviaciones en los extremos de la distribución, en los valores altos, sugiriendo colas poco más pronunciadas. Por tal, la gráfica expone que la normalidad de residuos se cumple en forma aceptable para fines modelado, presentando ligeras desviaciones que no invalidan el uso del modelo de regresión propuesto.

Figura 69. Grafica Q-Q de Residuos

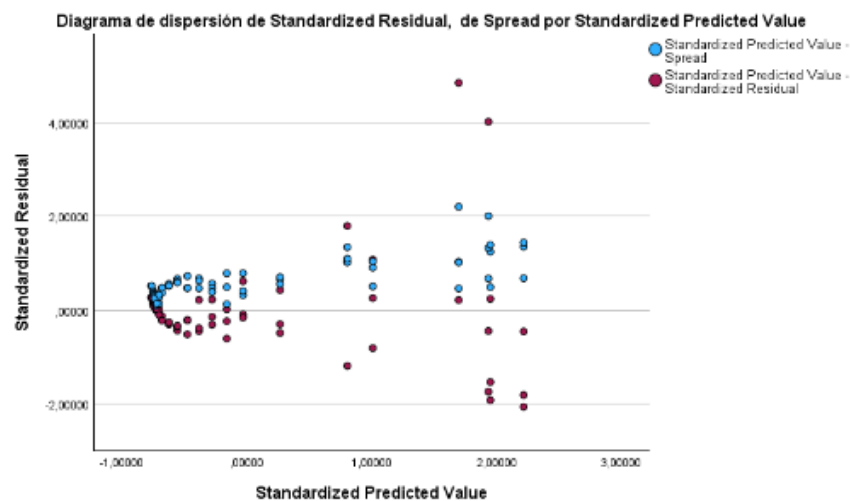


Elaborado por: Erik Romero

Fuente: SPSS 2.5.

La siguiente figura, muestra la dispersión entre residuos estandarizados y los valores predichos estandarizados que se utilizan para evaluar la homocedasticidad y la ausencia de patrones sistemáticos en el modelo de regresión. Los residuos se distribuyen de manera aleatoria entre el eje horizontal, indicando el modelo no presenta sesgos evidentes es la estimación de la potencia. En valores bajos y medios, la dispersión es uniforme, dando una varianza aproximadamente constante, mientras más elevados están, se identifica un incremento en la dispersión, atribuyendo a la naturaleza no lineal del proceso de conversión de la energética, demostrando que pequeños cambios de la velocidad del flujo del viento provoca cambios significativos en la potencia.

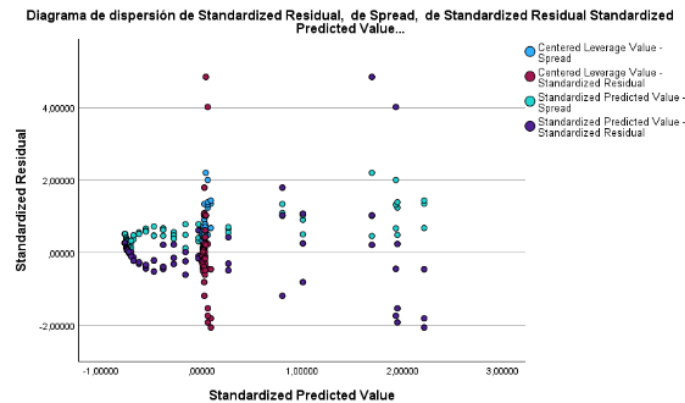
Figura 70. Grafica de residuos estandarizados vs valores predichos estandarizados.



Elaborado por: Erik Romero
Fuente: SPSS 2.5.

A continuación, en la figura muestra una relación entre los residuos estandarizados y los valores predichos estandarizados, pero ahora incorporando medidas de dispersión (spread) y leverage. Los puntos se distribuyen cerca del valor 0 sin formar patrones definidos, indicando que el modelo no presenta errores sistemáticos en la estimación de la potencia. Donde se observa una mayor dispersión de los residuos en valores altos, siendo vinculado con el comportamiento físico del sistema, porque en regímenes de más potencia, hay pequeñas variaciones de velocidad y el torque produce cambios más pronunciados.

Figura 71. Residual vs Leverage.



Elaborado por: Erik Romero

Fuente: SPSS 2.5.

Para finalizar el análisis analítico, se realizó estudios mediante varios modelos estadísticos:

Normalidad de los residuos

En la tabla de continuación, se utiliza la prueba Shapiro-wilk que es ideal para muestras pequeñas, obteniendo un resultado ($W=0,921$; $p < 0,001$) donde se rechaza la hipótesis nula (H_0) de normalidad por tener un valor menor a 0,05. Los residuos representan desviaciones respecto a una distribución normal ideal, que consiste con la naturaleza no lineal del fenómeno energético analizado.

Tabla 10. Test de normalidad de Shapiro-wilk

Data	Residuals (modelo)
W	0,921
Valor P	< 0,001

Elaborado por: Erik Romero

Fuente: SPSS 2.5.

En el caso de la cuadrática se obtienen los valores en la siguiente tabla, obtenido los valores igual con la prueba Shapiro-Wilk, el valor de ($W=0,719$), se rechaza la hipótesis nula (H_0), indica que los residuos siguen una distribución normal. No compromete la utilización del modelo cuadrático, ofreciendo un mejor ajuste global de los datos obtenidos.

Tabla 11. Test de normalidad de Shapiro-wilk

Data	Residuals (modelo)
W	0,719
Valor P	< 0,001

Elaborado por: Erik Romero

Fuente: SPSS 2.5.

Homocedasticidad (Breusch-Pagan)

Para saber si existe heterocedasticidad, se utiliza la prueba Breusch-Pagan, para saber si la varianza de errores no es constante, modelo de regresión. Los valores se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 12. Test de Breusch-pagan

Data	Modelo
BP	10,373
GL (Grados de Libertad)	2
Valor P	< 0,001

Elaborado por: Erik Romero

Fuente: SPSS 2.5.

Se observa que el valor de P ($< 0,001$) se rechaza la hipótesis nula (H_0) de homocedasticidad, indicando que la varianza de los residuos no es constante y depende de la velocidad del flujo de aire.

Autocorrelación (independencia de residuos)

En la prueba de Durbin-Watson (DW) se utilizó para que detecte autocorrelación en los residuos del modelo de regresión, donde comprueba si los errores del modelo están correlacionados, demostrando un patrón no aleatorio. Aquí la hipótesis nula (H_0) no existe autocorrelación de primer orden y la hipótesis alterna (H_1) existe autocorrelación.

El modelo viene interpretado por:

Un valor DW = 2 sugiriendo ausencia de autocorrelación.

Un valor < 2 indica autocorrelación positiva.

Un valor >2 indica autocorrelación negativa.

A continuación, se muestra la tabla con el respectivo resultado:

Tabla 13. Test de durbin-watson

Autocorrelación	Estadístico D-W	Valor P
	1,799	$< 0,001$

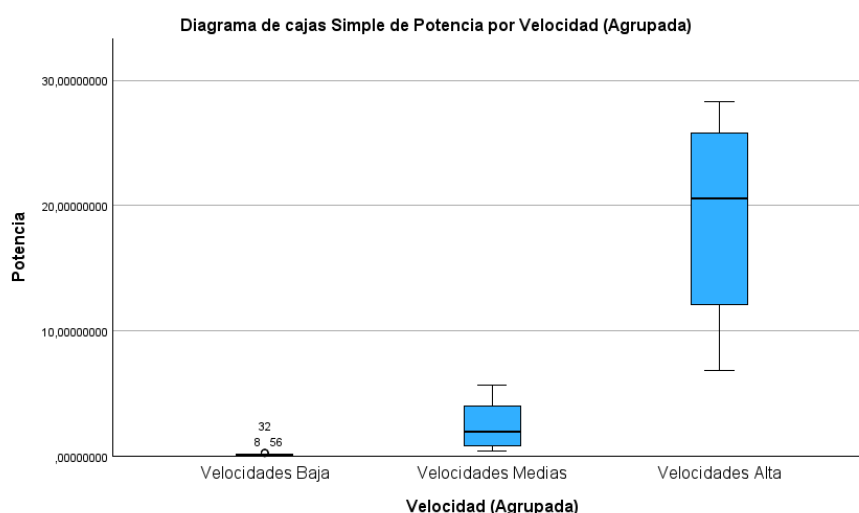
Elaborado por: Erik Romero

Fuente: SPSS 2.5.

El valor de DW (1,799) que se encuentra cerca del 2 lo cual es la ausencia de autocorrelación significativa entre los residuos y el valor de p ($< 0,001$) menor a ($> 0,05$), rechazando la hipótesis nula (H_0).

Para finalizar, se puede observar en la figura que muestra un diagrama de caja y bigotes, donde se puede ver la distribución de la potencia generada en distintos grupos de velocidades, que está entre las bajas, medias y altas. En velocidades bajas la potencia se concentra en valores cercanos a 0 con dispersión reducida. En velocidades medias, se presenta un incremento progresivo en la mediana como en la variabilidad de los datos y por último en velocidades altas, la potencia alcanza valores muy altos, presentando mayor dispersión reflejando comportamientos no lineales del sistema.

Figura 72. Diagrama de Cajas de la Potencia - Velocidades Agrupadas.



Elaborado por: Erik Romero

Fuente: SPSS 2.5.

Con lo que se puede observar en la figura y la figura permitieron evaluar visualmente el comportamiento del modelo de regresión y la validez de sus supuestos. En la figura de las

gráfica Q-Q mostro que los residuos se concentran en torno a la línea teórica, mostrando una a proximidad razonable a la normalidad con desviaciones pequeñas en la parte de afuera. En la figura se observó una dispersión aleatoria cerca de 0, sugiriendo ausencia de patrones sistemáticos y que existe una relación adecuada entre las variables. Y la figura permitió identificar que no existen observaciones con influencia excesiva sobre el modelo, reforzando la estabilidad y confiabilidad de los datos experimentales obtenidos.

Todos los resultados obtenidos, pudieron evidenciar y concluir que la potencia que se genero fue adecuado, donde se pudo evidenciar un rendimiento energético muy estable, el tornillo de Arquímedes produjo el torque necesario para la conversión eficiente de la energía del flujo de aire en energía, validando su comportamiento bajo las condiciones de experimentación.

Por último, para mencionar que la potencia generada tuvo una relación significativa con la velocidad de flujo de aire, pero con la variable de la temperatura no existe variaciones estadísticas en el comportamiento del aerogenerador. Confirmando con análisis de varianza y el estudio de residuos, donde se visualizaron que no detectaron diferencias muy significativas entre los diferentes rangos de temperatura. Respaldando la consistencia del modelo propuesto y confirma que el rendimiento energético del aerogenerador del tornillo de Arquímedes esta más dominado por la velocidad del viento, que se alinea con el comportamiento físico esperado del sistema. Las tablas a continuación se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) sobre los residuos no estandarizados, considerando el rango de temperaturas a cuál estaba sometido el estudio.

Tabla 14. Anova con temperatura

TABLA ANOVA CON TEMPERATURA					
Unstandardized Residual					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	,293	2	,146	,456	,636
Dentro de grupos	22,146	69	,321		
Total	22,439	71			

Elaborado por: Erik Romero

Fuente: SPSS 2.5.

En la tabla superior se visualiza el valor significativo (0,636) que es superior al p (0,05), donde las diferencias de residuos desaparecen. Se puede evidenciar una mayor homogeneidad entre los residuos. Confirmando que la temperatura no introduce variaciones sistemáticas en el

modelo, el efecto en la potencia puede considerarse estadísticamente no relevante dentro del grupo analizado.

Tabla 15. Anova sin temperatura

TABLA ANOVA SIN TEMPERATURA						
Unstandardized Residual						
	Suma	de	gl	Media	F	Sig.
	cuadrados			cuadrática		
Entre grupos	1,684		2	,842	2,624	,080
Dentro de grupos	22,146		69	,321		
Total	23,831		71			

Elaborado por: Erik Romero

Fuente: SPSS 2.5.

Donde se puede observar que el anova significativo (0,080) es mayor al p (0,05), poco cercano, donde la temperatura influye ligeramente pero no lo suficiente. Indicando la ausencia de diferencia estadística significativa entre los grupos, con ligera tendencia.

CAPITULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Se pudo analizar de manera integral el comportamiento del aerogenerador tornillo de Arquímedes dentro del túnel de viento virtual, realizando las condiciones óptimas para que funcione en aplicaciones de baja potencia. Facilito mucho la utilización del CFD del software, ya que facilito la comprensión de la interacción del flujo del aire y la geometría del aerogenerador tornillo de Arquímedes, donde se observó el comportamiento aerodinámico vinculado con el fenómeno físico que se esperaba. El análisis de los modelos aerodinámicos y electromecánicos permite identificar la relación directa entre la geometría del aerogenerador y el torque que se produjo, permite entender que el diseño propuesto fue capaz de transformar la energía cinética del viento en energía mecánica de una manera satisfactoria y eficiente. Fue muy determinante la definición de la región de rotación y del mallado local para poder obtener los datos numéricos estables.

Los valores obtenidos de torque mediante la simulación CFD y luego con cálculos la potencia, evidencio una tendencia creciente conforme aumentaron las condiciones de operación, validando el comportamiento energético del aerogenerador tornillo de Arquímedes. Permitiendo calcular la potencia mecánica de forma confiable, evidenciando que la geometría del diseño cumplió con los criterios necesarios para la aplicación de baja tensión.

La obtención de datos mediante el estudio paramétrico donde se realizarlo con diferentes velocidades de flujo de viento y con las diferentes condiciones de temperatura, permitió valorar el desempeño del aerogenerador en diferentes escenarios donde se demostró que el sistema si responde a variaciones en condiciones ambientales. Reforzando el uso del diseño geométrico del aerogenerador propuesto en contextos reales.

El uso del análisis estadístico complementó los resultados obtenidos por el CDF, organizando, interpretando y validar los datos del torque y potencia desde un enfoque cuantitativo. Los datos obtenidos en el estudio estadístico evidenciaron la relación significativa entre las variables analizadas, donde se fortaleció la confiabilidad de los resultados y reduciendo el desliz asociado a la interpretación numérica. Esta relación entre la simulación CFD y el análisis estadístico constituye una metodología sólida para evaluar de forma preliminar de aerogeneradores de baja potencia, obteniendo una información detallada sobre el desempeño energético del sistema antes de implementar experimentalmente.

Por último, los datos obtenidos confirman que el aerogenerador tornillo de Arquímedes da un comportamiento energético adecuado en aplicaciones de baja potencia, donde se considera que el sistema cumple satisfactoriamente con su configuración propuesta, ya que el torque y la potencia que se generan respondió satisfactoriamente con las condiciones de operaciones analizadas, sentando una base técnica para futuros estudios experimentales o aplicar para estudios que validen el desempeño energético en condiciones reales.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda aplicar un refinamiento progresivo del mallado, específicamente cerca de las aspas y en la región de interacción fluido-rotor, para un mejoramiento en la resolución de gradientes de velocidad y presión y así obtener datos aún más precisos.

Cuando se realice el ensamblado del túnel de viento y del aerogenerador, es recomendado asegurarse una correcta alineación del rotor con el eje principal del flujo, porque si existe desalineamiento o perturbaciones de cualquier tipo pueden alterar la distribución del flujo, afectando con la medición del torque y la potencia que este genera.

Se sugiere extender la metodología empleada en el estudio para aplicaciones experimentales, con la utilización de prototipos físicos para validar los resultados numéricos obtenidos y fortalecer la confiabilidad del análisis que se realizó en las simulaciones.

Para finalizar, es aconsejable el realizar cambios a la geometría del túnel de viento para futuros estudios, considerando modificaciones en la geometría de la contracción, panel enderezador del flujo, zona de pruebas y el difusor, para cuando se replique físicamente, mejorar la uniformidad del flujo y al mismo tiempo reducir pérdidas aerodinámicas que afecten los datos obtenidos del aerogenerador.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Porras, L. Navarrete, J. Ramírez, y S. Paredes, “Diseño de una turbina eólica espiral de arquímedes mediante software cad - cae”, *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*, vol. 4, nº 3, sep. 2023, doi: 10.56712/latam.v4i3.1125.
- [2] Ana Lucía Defaz Vizcaino, “Análisis y simulación de un prototipo de generador eólico de eje vertical tipo SAVONIUS para velocidades entre 5 Km/h Y 20 Km/h”, 2025.
- [3] “Simulación mediante la dinámica de fluidos”.
- [4] U. Académica y C. Álava Daniel Wladimir Fajardo Vergara Steven Manuel Tutor Ing Fernando López, “UNIVERSIDAD LAICA ‘ELOY ALFARO’ DE MANABÍ”.
- [5] M. Humberto Pillisa Rocha Roosevelt Israel García Guano, I. Luis Miguel Navarrete López, y D. S. Para Optimizar Rendimiento En Energía Hidrocinética, “UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA PROPUESTA TECNOLÓGICA Propuesta tecnológica presentado previo a la obtención del título de ingeniero electromecánico AUTORES: "SIMULACIÓN NUMÉRICA Y EXPERIMENTAL DE UNA TURBINA DE TORNILLO DE ARQUÍMEDES FABRICADA EN”.
- [6] G. Gerätebau GmbH, *Ingeniería de procesos*. Libro, 2024.
- [7] SC Respect ©, “Archimedes wind turbine”, *Artículo científico*, 2025.
- [8] P. Sołowiej y K. Łapiński, “Recent Progress in Research on the Design and Use of an Archimedes Screw Turbine: A Review”, 1 de enero de 2025, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*, *Artículo científico*. doi: 10.3390/su17010201.
- [9] S. Waters y G. A. Aggidis, “Over 2000 years in review: Revival of the Archimedes Screw from Pump to Turbine”, 6 de julio de 2015, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.rser.2015.06.028.
- [10] J. Rohmer, D. Knittel, G. Sturtzer, D. Flieller, y J. Renaud, “Modeling and experimental results of an Archimedes screw turbine”, *Renew. Energy*, vol. 94, pp. 136–146, ago. 2016, doi: 10.1016/j.renene.2016.03.044.
- [11] A. C. Sánchez, W. F. Galeano, y J. M. Zambrano, “Desing of a micro hydraulic generation system based on an Archimedes screw”, *Ingenius*, vol. 2023, nº 29, pp. 98–107, ene. 2023, doi: 10.17163/ings.n23.2023.09.

- [12] Esteban Wadimir Casa Lincango, “Diseño y Construcción de un Túnel de Viento a Escala Para Obtener Datos Mediante Pruebas Aerodinámicas”, Tesis de grado, 2023.
- [13] Otavalo Cuical José Gabriel Quilca Yacelga Esteban Rigoberto, “Implementación de un túnel de viento para vehículos a escala 1:18”, Tesis de grado, 2022.
- [14] M. H. P. R. a Roosevelt Israel García Guano, “Simulación numérica y experimental de una turbina de tornillo de Arquímedes fabricada en 3D para optimizar su rendimiento en energía”, Tesis de grado, Universidad Técnica de Cotopaxi, Cotopaxi - Latacunga, 2024.
- [15] Alex Ricardo Orozco Galán y Y. Automatización, “Implementación de un sistema de hidro generación eléctrica mediante una turbina helicoidal para la recuperación de energía aplicado en peceras decorativas”, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Tesis de grado, 2023.
- [16] Edison Darwin Gavilema Orosco, “Diseño y construcción de un módulo didáctico de control caudal para el laboratorio de control de la EIE - CRI de la ESPOCH”, Tesis de grado, 2022.
- [17] Priscila Nataly Guanolema Coba, “Diseño y simulación de una turbina hidráulica con tecnología biomimétrica para generar energía mecánica”, Tesis de grado, 2024.
- [18] Bastidas Villarreal Jean Pierre, “Estudio comparativo de sistemas de conversión eólica a energía eléctrica entre aerogeneradores resonantes por vibración inducida por vortex (VIV) con aerogeneradores eólicos con aspas”, Tesis de grado, 2024.
- [19] Andrés Felipe Hernández Durango, ““Diseño y fabricación de un prototipo de micro aerogenerador de baja potencia.””, Artículo científico, 2021.
- [20] L. E. B. P. Andrés Escobar Díaz, “Modelo matemático de un aerogenerador”, Artículo científico, 2022.
- [21] A. R. Beig y S. M. Muyeen, “Wind energy 4.3 Kinetic energy of wind 64 4.4 Aerodynamic force 65”, 2016. doi: 10.1016/B978-0-12-804448-3/00004-9.
- [22] A. D. Korawan y R. Febritasari, “Experimental investigations of number of blades effect on archimedes spiral wind turbine performance”, *Mechanical Engineering for Society and Industry*, vol. 4, nº 2, pp. 198–209, nov. 2024, doi: 10.31603/mesi.12373.
- [23] O. Andrés *et al.*, “Diseño y desarrollo de una estación eólica con tornillo de Arquímedes para el alumbrado autónomo de un parqueadero”, 2025.

- [24] I. Mihalik, M. Lazar, L. Simocko, N. Jasminska, T. Brestovic, y R. Dobakova, “Influence of the number of blades of the Archimedes wind turbine on its performance”, *MM Science Journal*, vol. 2024-December, pp. 7956–7960, dic. 2024, doi: 10.17973/MMSJ.2024_12_2024043.
- [25] “Principio de Arquímedes y Principio de Pascal”.
- [26] Elbibliote.com, *Energía*. Libro, 2002. [En línea]. Disponible en: www.educarchile.cl/
- [27] Secretaría de Energía - República de Argentina, *Conceptos sobre energía*. Libro, 2023.
- [28] M. Suau y D. E. Castro, “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MINI-TURBINA EÓLICA”, 2024.
- [29] E. Eólica, “Energías Renovables”, 2022.
- [30] Aprendemos tecnología, “LA ENERGIA ELECTRICA”, 2022.
- [31] S. Simmons, L. Miller, y W. David Lubitz, “Review and evaluation of Archimedes screw pump design guidance”, 2022.
- [32] Kimerius, “Eficiencia energética en motores eléctricos”, 2025.
- [33] Dra. Claudia Milagros Arispe Alburquerque Dra. Judith Soledad Yangali Vicente, “LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA”, 2025.
- [34] Marisela Dzul Escamilla, “¿QUÉ ES EL DISEÑO NO EXPERIMENTAL?”, 2025.
- [35] Brian Alexander Oñate Males, “Estimulación de la producción de energía eléctrica en base a la velocidad de viento registrado en la estación meteorológica”, 2025.

ANEXOS

Anexo 1. Carta de compromiso

Riobamba, noviembre 26 de 2025

CARTA DE COMPROMISO

De mi consideración:

Yo, **Erik Fernando Romero Sanchez**, estudiante de la carrera de Telecomunicaciones, con C.I. **06039944190**, me encuentro realizando la tesis "**Simulación del aerogenerador tornillo de Arquímedes en aplicaciones de baja tensión para optimizar el rendimiento energético.**" por medio del presente documento acepto y me comprometo a la realización de la tesis con el tema mencionado y en la participación del proyecto "**Evaluación financiera y estudio técnico, para la aplicación de generación eléctrica; mediante un sistema híbrido fotovoltaico-eólico, para la central de energía conectada a red de la Facultad de Ingeniería usando análisis estadístico con datos funcionales**" quien está bajo la Dirección del Dr. Manuel Antonio Meneses Freire PhD.

Para los fines pertinentes.

Atentamente


Erik Romero Sanchez
Estudiante
C.I: 0603944190


Dr. Manuel Antonio Meneses Freire PhD
Director del Proyecto

Anexo 2. Informe meteorológico del 2023



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE RECURSOS NATURALES

ESTACIÓN AGROMETEOROLÓGICA

ANUARIO CLIMATOLÓGICO

AÑO 2023

UBICACIÓN:	LONGITUD	78° 40' 59" W
	LATITUD	01° 38' 51" S
	ALTITUD	2850 msnm

REALIZADO POR:

Ing. Agr. Paulo César Tiupul Carrillo

Lcdo. Miguel Ángel Arévalo Rodríguez

RIOBAMBA – ECUADOR

Anexo 3. Temperatura del aire



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES
ESTACIÓN AGROMETEOROLÓGICA



TEMPERATURA DEL AIRE (°C)

TABLA 1

AÑO 2023

MESES	MEDIAS	EXTREMAS ABSOLUTAS			EXTREMAS MEDIAS	
		MÁXIMA	MÍNIMA	AMPLITUD	MÁXIMA	MÍNIMA
ENERO	13.0	24.0	2.4	21.6	20.3	8.1
FEBRERO	13.8	24.2	3.2	21.0	21.4	8.4
MARZO	13.4	24.0	3.7	20.3	20.7	7.9
ABRIL	13.7	22.8	5.7	17.1	20.5	8.7
MAYO	14.0	23.8	5.9	17.9	21.0	9.5
JUNIO	13.4	22.6	5.0	17.6	20.4	8.8
JULIO	13.2	24.8	3.8	21.0	20.6	8.6
AGOSTO	13.3	25.8	3.5	22.3	21.3	7.5
SEPTIEMBRE	13.8	26.3	1.9	24.4	22.3	7.1
OCTUBRE	15.1	26.4	6.4	20.0	22.4	9.3
NOVIEMBRE	15.2	26.8	5.5	21.3	23.0	9.6
DICIEMBRE	15.0	25.2	7.8	17.4	22.1	10.1
SUMA	166.7	296.7	54.8	241.9	255.9	103.7
MESES DE DATOS	12	12	12	12	12	12
MEDIA	13.9	24.7	4.6	20.2	21.3	8.6

Anexo 4. Informe de la humedad de Riobamba



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES
ESTACIÓN AGROMETEOROLÓGICA



HUMEDAD RELATIVA (%)

TABLA 2

AÑO 2023

MESES	MEDIA	EXTREMAS ABSOLUTAS		AMPLITUD	EXTREMAS MEDIAS	
		MÁXIMA	MÍNIMA		MÁXIMA	MÍNIMA
ENERO	73.9	99.0	20.0	79.0	96.4	40.1
FEBRERO	72.6	98.0	28.0	70.0	96.1	36.8
MARZO	75.0	98.0	23.0	75.0	95.7	39.9
ABRIL	76.1	97.0	29.0	68.0	95.2	41.3
MAYO	72.5	97.0	28.0	69.0	93.3	40.2
JUNIO	68.1	94.0	21.0	73.0	90.4	35.5
JULIO	68.1	96.0	25.0	71.0	92.4	33.7
AGOSTO	64.3	96.0	19.0	77.0	91.1	31.1
SEPTIEMBRE	60.3	94.0	20.0	74.0	89.9	28.5
OCTUBRE	65.6	96.0	21.0	75.0	92.6	30.7
NOVIEMBRE	65.1	95.0	14.0	81.0	90.4	30.4
DICIEMBRE	71.4	95.0	26.0	69.0	93.1	37.4
SUMA	833.1	1155.0	274.0	881.0	1116.7	425.7
MESES DE DATOS	12	12	12	12	12	12
MEDIA	69.4	96.3	22.8	73.4	93.1	35.5

Anexo 5. Informe del viento



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES
ESTACIÓN AGROMETEOROLÓGICA



VIENTO (m/s)

TABLA 3

AÑO 2023

MESES	DIRECCIÓN	VELOCIDAD m/s		
		MEDIAS	MÁXIMA	MÍNIMA
ENERO	SE	1.5	2.6	0.5
FEBRERO	SE	1.5	2.8	0.3
MARZO	SE	1.2	2.2	0.5
ABRIL	SE	1.1	2.0	0.3
MAYO	SE	1.4	2.5	0.5
JUNIO	SE	1.5	2.5	0.5
JULIO	SE	1.6	3.0	0.5
AGOSTO	SE	1.6	2.8	0.5
SEPTIEMBRE	SE	1.4	3.0	0.5
OCTUBRE	SE	1.5	3.0	0.5
NOVIEMBRE	SE	1.6	2.8	0.3
DICIEMBRE	SE	1.3	2.4	0.5
SUMA	SE	17.2	31.5	5.5
MESES DE DATOS		12	12	12
MEDIA		1.4	2.6	0.5

Anexo 6. Informe meteorológico del 2024



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE RECURSOS NATURALES

ESTACIÓN AGROMETEOROLÓGICA

ANUARIO CLIMATOLÓGICO

AÑO 2024

UBICACIÓN:	LONGITUD	78° 40' 59" W
	LATITUD	01° 38' 51" S
	ALTITUD	2850 msnm

REALIZADO POR:

Ing. Agr. Paulo César Tiupul Carrillo

RIOBAMBA – ECUADOR



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES
ESTACIÓN AGROMETEOROLÓGICA



TEMPERATURA DEL AIRE (°C)

TABLA 1

AÑO 2024

MESES	MEDIAS	EXTREMAS ABSOLUTAS		AMPLITUD	EXTREMAS MEDIAS	
		MÁXIMA	MÍNIMA		MÁXIMA	MÍNIMA
ENERO	14.9	26.0	4.3	21.7	22.1	9.5
FEBRERO	15.0	26.2	6.2	20.0	22.4	9.8
MARZO	15.2	27.6	6.9	20.7	23.0	9.6
ABRIL	14.7	25.4	5.1	20.3	21.6	9.6
MAYO	14.9	24.5	7.5	17.0	21.4	9.9
JUNIO	13.9	25.4	5.9	19.5	20.8	8.5
JULIO	13.0	22.5	3.8	18.7	20.4	8.3
AGOSTO	13.1	23.4	2.8	20.6	21.3	6.9
SEPTIEMBRE	13.6	25.2	2.0	23.2	22.0	6.6
OCTUBRE	15.4	27.2	5.8	21.4	23.8	9.5
NOVIEMBRE	15.3	26.2	4.9	21.3	24.1	9.2
DICIEMBRE	14.4	25.4	3.4	22.0	21.6	9.6
SUMA	173.4	305.0	58.6	246.4	264.4	107.0
MESES DE DATOS	12	12	12	12	12	12
MEDIA	14.4	25.4	4.9	20.5	22.0	8.9



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES
ESTACIÓN AGROMETEOROLÓGICA



HUMEDAD RELATIVA (%)

TABLA 2

AÑO 2024

MESES	MEDIA	EXTREMAS ABSOLUTAS		AMPLITUD	EXTREMAS MEDIAS	
		MÁXIMA	MÍNIMA		MÁXIMA	MÍNIMA
ENERO	67.2	95.0	16.0	79.0	92.7	33.2
FEBRERO	70.1	96.0	26.0	70.0	92.6	35.1
MARZO	66.8	95.0	17.0	78.0	92.0	33.0
ABRIL	72.8	95.0	25.0	70.0	93.7	38.6
MAYO	72.7	95.0	23.0	72.0	93.7	38.8
JUNIO	69.1	95.0	18.0	77.0	93.1	35.5
JULIO	67.7	96.0	24.0	72.0	92.8	32.8
AGOSTO	62.9	97.0	20.0	77.0	92.0	28.8
SEPTIEMBRE	63.3	99.0	19.0	80.0	93.4	29.8
OCTUBRE	64.0	99.0	17.0	82.0	95.0	26.8
NOVIEMBRE	60.6	99.0	11.0	88.0	89.3	25.2
DICIEMBRE	72.6	99.0	20.0	79.0	96.8	35.9
SUMA	809.7	1160.0	236.0	924.0	1117.2	393.4
MESES DE DATOS	12	12	12	12	12	12
MEDIA	67.5	96.7	19.7	77.0	93.1	32.8



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES
ESTACIÓN AGROMETEOROLÓGICA



VIENTO (m/s)

TABLA 3

AÑO 2024

	DIRECCIÓN	VELOCIDAD m/s		
MESES		MEDIAS	MÁXIMA	MÍNIMA
ENERO	SE	1.6	3.0	0.5
FEBRERO	SE	1.5	3.3	0.5
MARZO	SE	1.4	2.5	0.5
ABRIL	SE	1.1	2.0	0.5
MAYO	SE	1.3	3.0	0.5
JUNIO	SE	1.4	2.5	0.3
JULIO	SE	1.8	3.8	0.5
AGOSTO	SE	1.8	2.8	0.5
SEPTIEMBRE	SE	1.6	2.8	0.5
OCTUBRE	SE	1.4	3.0	0.3
NOVIEMBRE	SE	1.2	2.5	0.5
DICIEMBRE	SE	1.3	2.3	0.5
SUMA	SE	17.5	33.3	5.7
MESES DE DATOS		12	12	12
MEDIA		1.5	2.8	0.5

Anexo 7. Cálculos del túnel de viento y del aerogenerador tornillo de Arquímedes.

Contractor

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad (7)$$

Donde:

A_1 : área de entrada del contractor

A_2 : área de la zona de pruebas (0,7m)

V_1 : velocidad de entrada

V_2 : velocidad en la zona de pruebas

Zona de Pruebas

$$L = 700mm = 0,7m$$

Area transversal

$$A = L * L = 0,7 * 0,7 = 0,49m^2$$

$$Dh = \frac{4A}{p} \quad (8)$$

Donde:

Dh = diámetro hidráulico de la sección

$$A = \text{área} = (0,7m) * (0,7m) = 0,49m^2$$

$$P = 4A = 4(0,7) = 2,8m$$

$$D = \frac{4 (0,49m^2)}{2,8m}$$

$$D = 0,7 m$$

Cálculo el número de Reynolds con la siguiente formula:

$$Re = \frac{\rho \cdot v_{central} D}{u} \quad (9)$$

Donde:

$$\rho = 0,878 \text{ kg/m}^3$$

$$v_{central} = 45,66 \text{ m/s}$$

$$u = 1,7894 * 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m.s}}$$

$$Re = \frac{\left(0,878 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) * \left(45,66 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right) * (0,7\text{m})}{1,7894 * 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m.s}}}$$

$$Re = 1568270,71$$

Difusor

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad (10)$$

A_1 : área de entrada del difusor

A_2 : área de del contractor (1212 mm)

$$A_2 > A_1$$

Entonces

$$V_2 < V_1$$

Area de entrada

$$A = 0,7 * 0,7 = 0,49\text{m}^2$$

Area de salida

$$A = 1212\text{mm} * 1212\text{mm} = 1469\text{m}^2$$

Relación entre las áreas

$$\frac{A_2}{A_1} \approx \frac{1,469}{0,49} \approx 3,0$$

Relación entre las velocidades (idealmente debería bajar $\sim 1/3$, si fuese laminar el flujo)

$$V_2 \approx V_1 \left(\frac{A_2}{A_1} \right) \approx 0,33V_1$$

Aerogenerador Tornillo de Arquímedes

Longitud axial del rotor:

$$L_{rotor} = 1,2m$$

$$n = \frac{L_{rotor}}{p} \quad (11)$$

Donde:

p = avance axial por una vuelta

n = número de vueltas del tornillo/hélice

L_{rotor} = longitud axial (1,2m)

$$p = \frac{L_{rotor}}{n}$$

$$p = \frac{1,2}{3}$$

$$p = 0,4m$$

Ángulo de la hélice

$$\tan (\beta(r)) = \frac{p}{2\pi r} \quad (12)$$

Donde:

p = avance axial por una vuelta (0,4m)

$$\beta_R = \arctan \frac{p}{2\pi r}$$

Separación de las aspas

$$\Delta\theta = \frac{360^\circ}{3} \quad (13)$$

$$\Delta\theta = 120^\circ$$

Top View:

- Overall width: 700.00
- Overall height: 10.00
- Grid of holes: 20 columns by 16 rows.

Isometric View:

- Shows the plate's thickness and the arrangement of the holes.

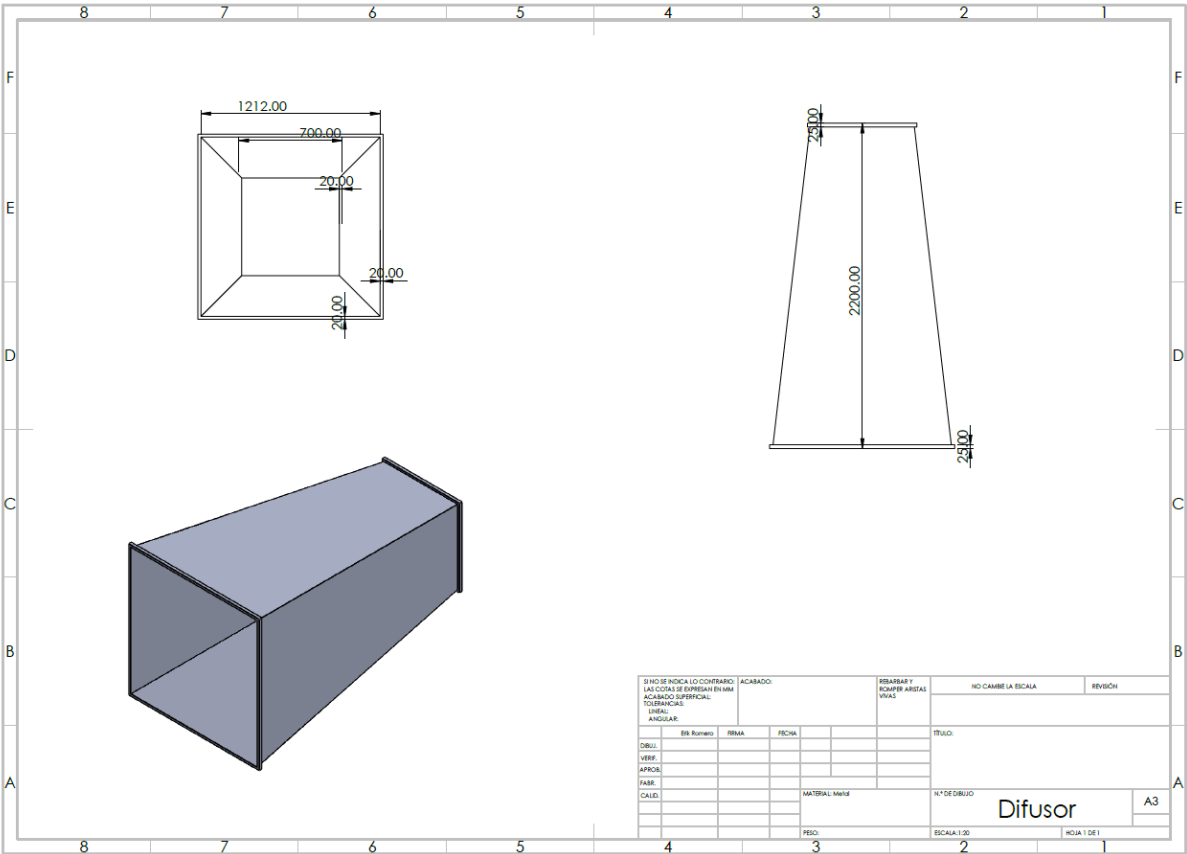
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE ESPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:	REBARBOS Y SCAPES ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
DISEÑO:	BIS Numero	BISMA	FECHA	TÍTULO:	
VERS:					
APROB:					
FABR:					
CAUD:				Nº DE DIBUJO	A3
			MATERIAL/MATE	P. Enderezador	
			PECO:	ESCALA 1:200	HOJA 1 DE 1

Technical drawing of a trapezoidal container with three views:

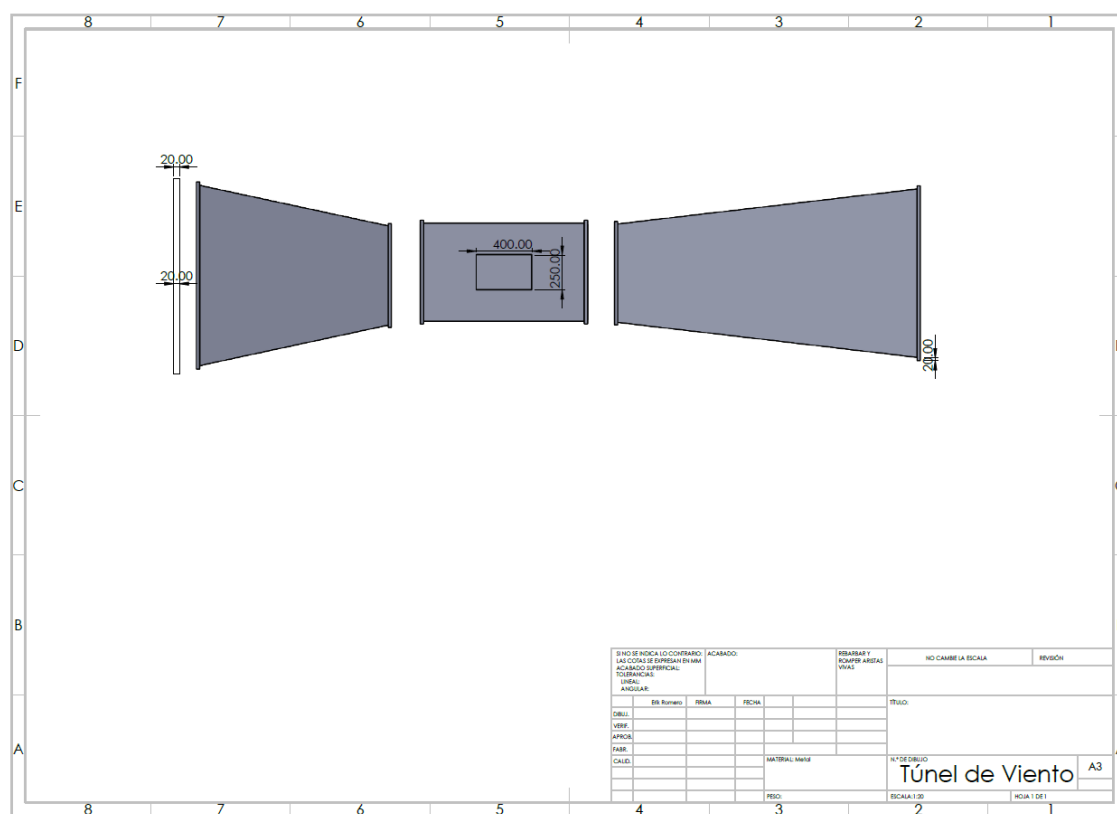
- Top View:** A square with outer dimensions of 1300.00 and inner dimensions of 700.00. The wall thickness is indicated as 25.00.
- Side View:** A trapezoid with a height of 1400.00, a top width of 700.00, and a bottom width of 1300.00. The wall thickness is indicated as 25.00.
- Isometric View:** A 3D representation of the container, showing its trapezoidal shape and wall thickness.

Technical drawing of a rectangular box with three views: top, front, and side. The top view shows a rectangle with overall dimensions of 700.00 mm by 1200.00 mm and an inner opening of 680.00 mm by 1080.00 mm. The front view shows a rectangle with a height of 1200.00 mm and a width of 700.00 mm. The side view shows a rectangle with a depth of 25.00 mm. The drawing is labeled 'ZonadePruebas' and 'A3'.

Anexo 11. Dimensiones del Difusor



Anexo 12. Dimensiones del Túnel de Viento.



Anexo 13. Dimensiones Aerogenerador Tornillo Arquímedes.

