



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**  
**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

**ANÁLISIS DE RENDIMIENTO DEL PROTOTIPO DE LA TURBINA  
AERODINÁMICA BAT**

PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO ELÉCTRICO

**AUTOR:**

Kevin Francisco Yantibug Bombon

**TUTOR:**

Phd. Secundino Marrero Ramírez

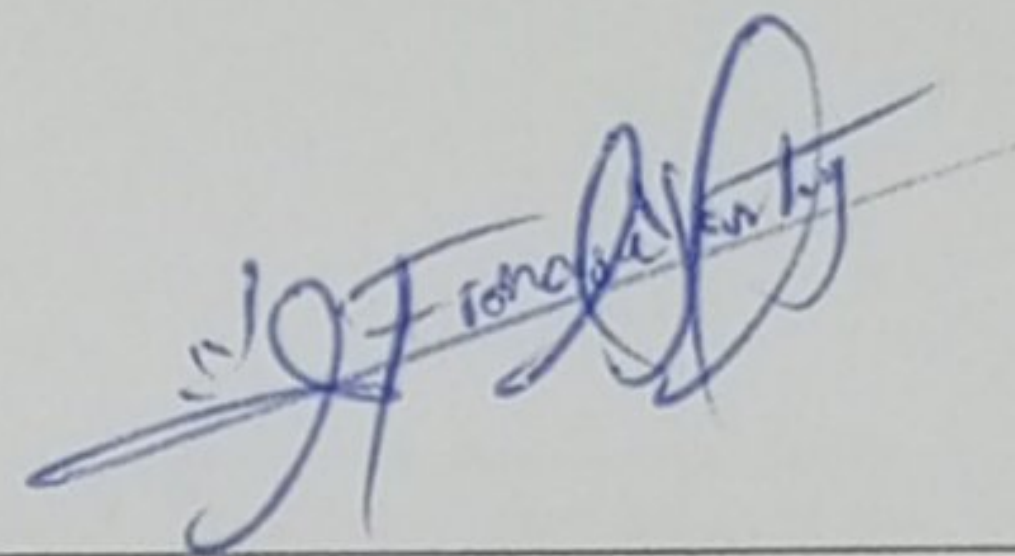
**LATACUNGA, JULIO, 2025**

Latacunga, 28 de Julio, 2025.

### DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, **KEVIN FRANCISCO YANTIBUG BOMBON**, declaro ser autor (a) del proyecto de titulación “**ANALISIS DE RENDIMIENTO DEL PROTOTIPO DE LA TURBINA AERODINÁMICA BAT**”, siendo el PhD. Secundino Marrero Ramírez tutor del presente trabajo de titulación; y eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo de titulación, son de mi exclusiva responsabilidad.



---

Kevin Francisco Yantibug Bombon  
CC. 1751480060

Latacunga, 28 de Julio, 2025.

**AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

En calidad de Tutor del Trabajo de Investigación sobre el título: “**Análisis de rendimiento del prototipo de turbina aerodinámica BAT**”, propuesto por el estudiante **Kevin Francisco Yantibug Bombon** de la Carrera de **Electricidad**, considero que dicho proyecto de titulación cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos al tribunal de lectores.

---

PhD. Secundino Marrero Ramírez  
C.C. 1757107907  
TUTOR

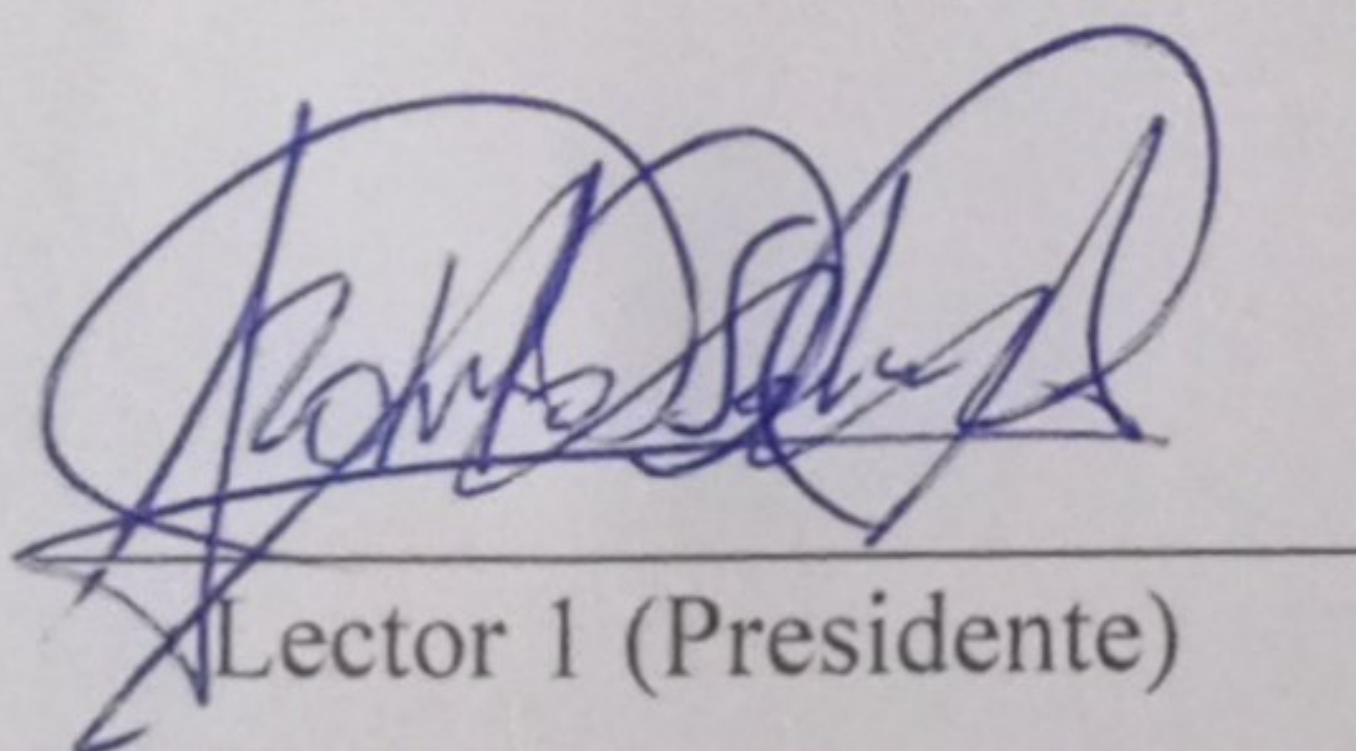
Latacunga, 28 de Julio, 2025.

### AVAL DE APROBACIÓN DE LECTORES

Cumpliendo con el Reglamento de Titulación de la Universidad Técnica de Cotopaxi, en calidad de Lectores de Tribunal de Proyecto de Investigación con el Título “ANÁLISIS DE RENDIMIENTO DEL PROTOTIPO DE LA TURBINA AERODINÁMICA BAT”, propuesto por el o la estudiante **Kevin Francisco Yantibug Bombon** de la Carrera de **Electricidad**, me permito indicar que el estudiante ha concluido todas las observaciones y realizado las correcciones señaladas por el Tribunal de Lectores, por lo cual presentamos el Aval de aprobación del Proyecto de Titulación correspondiente a la modalidad **presencial** en virtud de lo cual el o la postulante puede presentarse a la Defensa de su Proyecto de Titulación.

Particular que pongo en su conocimiento para los fines legales pertinentes.

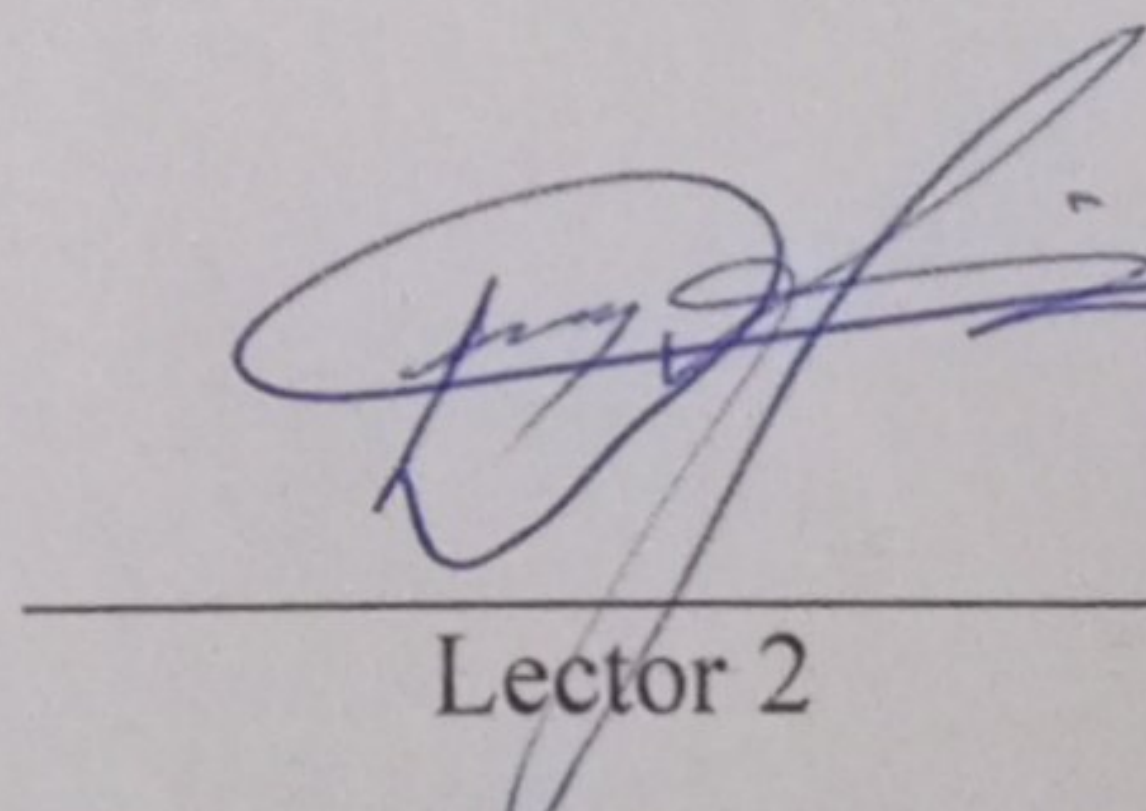
Atentamente,



Lector 1 (Presidente)

MSc. Edgar Roberto

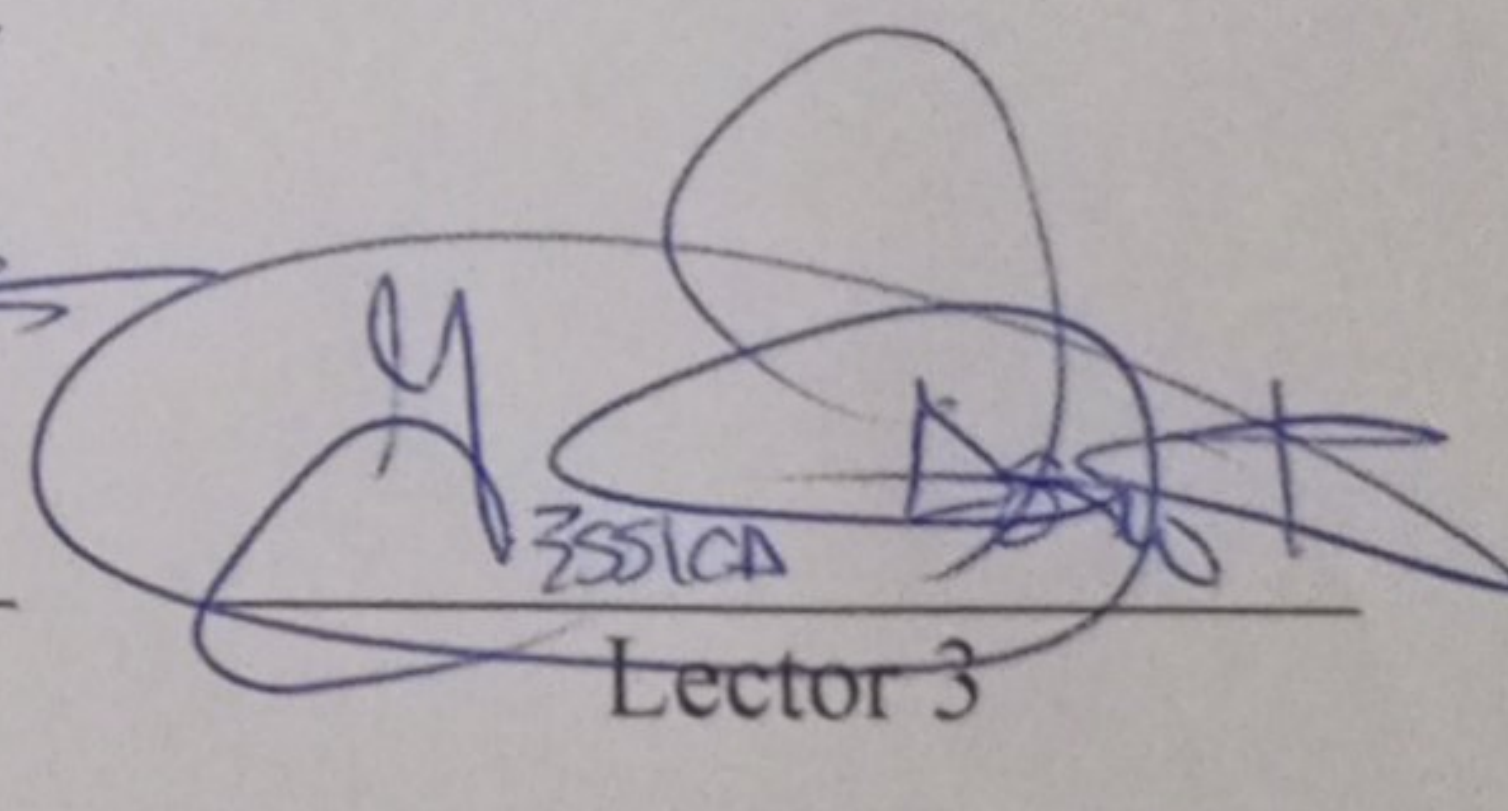
Salazar Achig



Lector 2

MSc. Diego Leonardo

Jimenez Jimenez



Lector 3

MSc. Jessica Nataly

Castillo Fiallos

## **AGRADECIMIENTO Y DEDICATORIA**

Mi nombre es Yantibug Bombon Kevin Francisco, padre, hijo, hermano, esposo, amigo, y agradezco a todas las personas que hicieron esto posible, agradezco y dedico este título a mis padres Francisco Yantibug y Olga Bombon, que siempre me acompañaron en mi carrera estudiantil, a mi esposa Fátima Tipán, por alentarme a siempre seguir alcanzando nuevas metas.

Siendo honesto, no lo hubiera logrado solo, a estas alturas de mi carrera, entiendo que no voy solo a defender este título, llevo conmigo el esfuerzo, dedicación y sufrimiento de mi padre, por darme lo mejor, y buscar siempre que tuviera la educación que el no tuvo o no se supieron apoyar para alcanzarla, y siendo sincero, sin él, no hubiera tomado la decisión de seguir mi carrera, esta carrera que despertó en mi felicidad, motivación y creatividad.

Llevo el dolor, cansancio y esperanzas de mi madre por verme alcanzar algo más allá de lo inimaginable.

Es en este momento, que todo sermón, castigo, y consejos de mis padres cobran sentido, ya que, gracias a ellos, estoy en donde quiero estar, logrando mis metas, siempre saliendo adelante con mi esfuerzo y dedicación, siempre mejorando y no dejando de lado, la palabra Humildad, aquello que siempre nos llevará lejos en la vida.

Llevo las esperanzas y sueños de mi esposa por alcanzar un futuro prometedor, a aquella persona que nunca me abandono cuando no tenía nada, aquella persona que me impulsa cada día, y me da aliento para seguir adelante y sacar siempre adelante a la familia que juntos construimos, y vamos a seguir edificando.

Llevo las ilusiones de mi Hija, Valentina, de ver a su padre convertido en un profesional, quien en su corta edad siempre me alentaba a seguir adelante, bastaba con mirar su fotografía para saber que, si se podía, para darme cuenta que detrás de mí venía alguien que se sentirá orgullosa, de lo que soy y seré.

Agradezco a mis abuelitos, María, José y mis abuelitos prestados, Ofelia y José, quienes me apoyaron y buscaron la forma para que yo pudiera alcanzar esta meta, ayudándome siempre que lo necesitará.

Agradezco a mi madre prestada, Janet, quien me apoyo, y me acogió como un hijo más y estaba siempre presta a apoyarme en cada cosa que necesitará.

Me llevo en el corazón a aquellas personas que no pudieron ver el profesional que seré, este título, va para aquella persona que le prometí un último baile, a mi abuelito Ricardo, mientras desarrollé este tema de investigación sentí cuanto duele no haber cumplido una promesa, antes de que partiera al cielo.

Agradezco infinitamente a todas las personas a mi alrededor quienes me ayudaron, me apoyaron y cuidaron, no solo de mi sino también de mi familia, Dios les pague por su ayuda, por su comprensión y su paciencia, por cada esfuerzo invertido en mí, para que lograré hacer mis metas realidad.

# **UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**

## **FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS**

### **TITULO: “ANÁLISIS DE RENDIMIENTO DEL PROTOTIPO DE LA TURBINA AERODINÁMICA BAT”**

**Autor:** Kevin Francisco Yantibug Bombon

#### **RESUMEN**

En el siguiente proyecto de investigación, se realizó el análisis de rendimiento de La Turbina Aerodinámica BAT (Buoyant Airborne Turbines) como una mejor alternativa, frente a los aerogeneradores convencionales, teniendo en cuenta el marco de tránsito energético hacia fuentes más limpias y sostenibles. Se realizó el estudio de viabilidad operativa y el comportamiento del recurso eólico a alturas superiores en comparación a aquellas utilizadas normalmente por los sistemas convencionales. El trabajo se estructuró en diferentes apartados; así, en primer lugar, se llevó a cabo la recolección y el tratamiento de los datos atmosféricos referentes a la velocidad del viento y cómo la misma varía en relación a la altura, se desarrolló la investigación sobre los prototipos existentes del BAT y el factor del  $C_p$  – Coeficiente de potencia - , siendo el mismo, el punto de partida para los cálculos realizados y correspondiente análisis del rendimiento del BAT a diferentes alturas, lo que nos llevaría la final a compararlo con los aerogeneradores convencionales, los cuales, se encuentran con la barrera de mejora, por la altura a la que operan comúnmente, determinando cual sería la opción con mayor viabilidad en cierto entorno determinado.

**Palabras clave:** BAT, Potencia generada, Rendimiento, Aerogenerador, Altura,  $C_p$ .

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS**

**TITLE: “PERFORMANCE ANALYSIS OF THE BAT AERODYNAMIC  
TURBINE PROTOTYPE”**

**Author:** Kevin Francisco Yantibug Bombon

**ABSTRACT**

In the following research project, the performance of the Buoyant Airborne Turbines (BAT) was analyzed as a better alternative to conventional wind turbines, taking into account the energy transition framework toward cleaner and more sustainable sources. An operational feasibility study was conducted, as well as the behavior of the wind resource at higher altitudes compared to those typically used by conventional systems. The work was structured into different sections: Thus, first, atmospheric data regarding wind speed and how it varies with height were collected and processed. Research was then conducted on existing BAT prototypes and the  $C_p$  factor (Power Coefficient). This factor was used as the starting point for the calculations and corresponding analysis of BAT performance at different heights. This ultimately led us to compare it with conventional wind turbines, which face a barrier to improvement due to the height at which they operate in combination, determining which would be the most viable option in a given environment.

**Keywords:** BAT, Generated Power, Performance, Wind Turbine, Height,  $C_p$ .

## ÍNDICE GENERAL

1.	INFORMACIÓN GENERAL .....	1
2.	INTRODUCCIÓN.....	3
2.1.	Situación Problemática.....	4
2.2.	Formulación del problema.....	4
2.3.	Objeto y Campo de acción.....	5
2.4.	Beneficiarios.....	5
2.5.	Justificación.....	5
2.6.	Objetivos.....	6
2.7.	Sistema de Tareas .....	7
3.	FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA .....	8
3.1.	El viento.....	8
3.2.	Límite de Betz .....	14
3.3.	Densidad del aire .....	15
3.4.	Fórmula de Potencia .....	16
3.5.	Rendimiento de un Generador.....	16
3.6.	Turbina Aerodinámica BAT.....	17
4.	MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS .....	29
4.1.	Metodología.....	29
4.2.	Softwares utilizados.....	29

4.3.	Actividades .....	29
5.	ANÁLISIS Y RESULTADOS .....	34
5.1.	Revisar las características técnicas:.....	34
5.2.	Investigar sobre el Aerogenerador convencional del Parque Villonaco.....	37
5.3.	Extrapolar la variación de la velocidad del viento con respecto a la altura....	43
5.4.	Calcular la potencia de salida del BAT .....	48
5.5.	Cálculo del rendimiento del Aerogenerador BAT.....	53
5.6.	Análisis de rendimiento del Aerogenerador convencional del Parque Eólico Villonaco contra el BAT.....	55
5.7.	Cálculo de aspas necesarias para la óptima operación .....	58
5.8.	Cálculo de la potencia del BAT – aspas calculadas .....	59
5.9.	Cálculo del rendimiento del BAT.....	63
5.10.	Comparación de Rendimiento del aerogenerador convencional, el BAT, y el BAT con aspas calculadas .....	66
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	70
6.1.	Conclusiones.....	70
6.2.	Recomendaciones .....	70
7.	BIBLIOGRAFIA .....	71

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proceso del aire en el día [8] .....	9
Figura 2. Proceso del aire en la noche [8] .....	10
Figura 3. Comportamiento del viento - Inglés.....	13
Figura 4. Comportamiento del viento - Español .....	13
Figura 5. Comparación de alturas Aerogenerador – BAT.....	18
Figura 6. Partes del BAT – Inglés .....	19
Figura 7 Partes del BAT – español.....	20
Figura 8. Prototipo del BAT – Altaeros .....	22
Figura 9. Diseño de BAT – Altaeros .....	23
Figura 10. Mantenimiento del BAT .....	24
Figura 11. Aerostato S500 SAWES atado y su estación base.....	25
Figura 12. Sierra S500.....	26
Figura 13. BAT en vuelo .....	27
Figura 14. Sierra S1000.....	28
Figura 15. Modelo Sierra S500 .....	35
Figura 16. Modelado del Sierra S500 - AutoCAD .....	37
Figura 17. Aerogeneradores del Parque Eólico Villonaco .....	38
Figura 18. Comparación del $C_p$ y límite de Betz - Aerogenerador convencional.....	41
Figura 19. Modelado de Aerogenerador convencional .....	42
Figura 20. Extrapolación del viento .....	48

Figura 21. Comparación del $C_p$ y Límite de Betz - BAT.....	49
Figura 22. Resultados de potencia de salida.....	53
Figura 23. Comparación de alturas.....	56
Figura 24. Comparación de rendimiento .....	57
Figura 25. Modelado de aspas calculadas .....	59
Figura 26. Resultado de potencia de salida - aspas calculadas.....	63
Figura 27. Comparación de alturas.....	67
Figura 28. Comparación de rendimiento .....	68

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Modalidad de titulación.....	1
Tabla 2. Área de conocimiento.....	2
Tabla 3. Sistema de tareas .....	7
Tabla 4. Valor de rugosidad [10].....	11
Tabla 5. Densidad del aire respecto a la altura .....	15
Tabla 6. Actividades a desarrollar .....	29
Tabla 7. Ficha Técnica del Parque Eólico Villonaco [21].....	38
Tabla 8. Verificación del valor de densidad .....	39
Tabla 9. Valores de $C_p$ .....	40
Tabla 10. Potencia de salida .....	42
Tabla 11. Cálculo de rendimiento del Aerogenerador.....	43
Tabla 12. Alturas de estudio .....	44
Tabla 13. Rugosidad de Villonaco .....	44
Tabla 14. Velocidad a 100 metros de altura .....	45
Tabla 15. Velocidad a 200 metros de altura .....	45
Tabla 16. Velocidad a 300 metros de altura .....	46
Tabla 17. Velocidad a 400 metros de altura .....	46
Tabla 18. Velocidad a 500 metros de altura .....	47
Tabla 19. Extrapolación del viento.....	47
Tabla 20. Comparación $C_p$ y límite de Betz. ....	49

Tabla 21. Cálculo de potencia a 65m de altura.....	49
Tabla 22. Cálculo de potencia a 100m de altura.....	50
Tabla 23. Cálculo de potencia a 200m de altura.....	50
Tabla 24. Cálculo de potencia a 300m de altura.....	51
Tabla 25. Cálculo de potencia a 400m de altura.....	51
Tabla 26. Cálculo de potencia a 400m de altura.....	52
Tabla 27. Resultados de potencia de salida .....	52
Tabla 28. Rendimiento a 65 metros de altura.....	54
Tabla 29. Rendimiento a 100 metros de altura.....	54
Tabla 30. Rendimiento a 200 metros de altura.....	54
Tabla 31. Rendimiento a 300 metros de altura.....	55
Tabla 32. Potencia a 400 metros de altura.....	55
Tabla 33. Potencia a 500 metros de altura.....	55
Tabla 34. Comparación de rendimiento .....	57
Tabla 35. Potencia a 65 metros de altura - aspas calculadas .....	59
Tabla 36. Potencia a 100 metros de altura - aspas calculadas .....	60
Tabla 37. Potencia a 200 metros de altura - aspas calculadas .....	60
Tabla 38. Potencia a 300 metros de altura - aspas calculadas .....	61
Tabla 39. Potencia a 400 metros de altura - aspas calculadas .....	61
Tabla 40. Potencia a 500 metros de altura - aspas calculadas .....	62
Tabla 41. Resultados de potencia de salida - aspas calculadas .....	62

Tabla 42. Rendimiento a 65 metros de altura - aspas calculadas .....	64
Tabla 43. Rendimiento a 100 metros de altura - aspas calculadas .....	64
Tabla 44. Rendimiento a 200 metros de altura - aspas calculadas .....	65
Tabla 45. Rendimiento a 300 metros de altura - aspas calculadas .....	65
Tabla 46. Rendimiento a 400 metros de altura - aspas calculadas .....	65
Tabla 47. Rendimiento a 500 metros de altura - aspas calculadas .....	66
Tabla 48. Generador usado para los cálculos del rendimiento .....	66
Tabla 49. Comparación de rendimiento .....	68

# 1. INFORMACIÓN GENERAL

**Tema del proyecto:** ANÁLISIS DE RENDIMIENTO DEL PROTOTIPO DE LA TURBINA AERODINÁMICA BAT.

**Modalidad de Titulación:**

Tabla 1. Modalidad de titulación

<b>MODALIDAD DE TITULACIÓN</b>	<b>HOMOLOGACIONES PARA INFORME FINAL DE TITULACIÓN</b>	<b>SELECCIÓN</b>
Propuesta tecnológica	Informe de propuesta tecnológica	
	Patente, Modelo de utilidad, Certificado de propiedad intelectual.	
	Artículo científico	
Proyecto de investigación	Informe de Proyecto de investigación	X
	Artículo científico	
	Patente, Modelo de utilidad, Certificado de propiedad intelectual.	
Examen de indicadores de RDA		

**Equipo de Trabajo del Trabajo de Titulación:** Kevin Francisco Yantibug Bombon

**Área de Conocimiento:**

Tabla 2. Área de conocimiento

33 Ciencias Tecnológicas	3301 Ingeniería y Tecnología Aeronáuticas	09 Compresores y Turbinas
	3322 Tecnología Energética	02 Generación de Energía
		03 Generadores de Energía

**Línea de investigación:** Energías alternativas y renovables, eficiencia energética y protección ambiental.

**Sub líneas de investigación de la Carrera:** Diseño, construcción y explotación eficiente de sistemas eléctricos, con energía convencional y alternativa.

## 2. INTRODUCCIÓN

La energía eléctrica, aquella que nos permite realizar diferentes acciones, y hacer más fácil nuestras tareas diarias o cotidianas, ha sido profundamente estudiada por cientos de años e incluso comparada con emociones humanas.

Citando a Nikola Tesla: “Si tu odio pudiera ser convertido en electricidad, se podría iluminar el mundo entero” [1], se hizo énfasis en aquella frase, ya que la electricidad ha sido un eminente blanco de investigación, problemática y discusión, llevadas a cabo por grandes inventores e investigadores a lo largo de la historia, los cuales han desarrollado múltiples formas de generarla, transmitirla y distribuirla, en la actualidad, en nuestro país -Ecuador- se cuenta con varias formas de generación, entre ellas: Centrales hidroeléctricas, Térmicas, Eólicas, Geotérmicas, entre otras formas que están por implementarse y se encuentran en objeto de estudio [2]

El presente proyecto de investigación se centra en aquella energía proveniente del viento – Eólica- , y los generadores que usan este tipo de energía para brindarnos electricidad, se conoce la gravedad del bajo rendimiento de los aerogeneradores convencionales [3], por tanto, esta línea de investigación va hacia la comparación del rendimiento de un aerogenerador convencional, contra una forma actualizada de generación y aprovechamiento de la energía eólica, llamada BAT (Buoyant Airborne Turbine) o turbina aerotransportada flotante [4].

El BAT vio la luz hace poco tiempo, pero ha demostrado dar mejores resultados, aumentando de manera considerable el aprovechamiento de la energía eólica para la conversión de energía mecánica en energía eléctrica, gracias a que puede operar a grandes alturas en las cuales el viento presenta beneficios de constancia y velocidad..

A veces la humanidad tiende a conformarse con un mismo sistema haciendo que con el tiempo, este se vuelva obsoleto, ya sea por cambios en infraestructura, clima, factores externos y el propio ser humano, en el caso Charles Francis Brush consiguió ser parte del cambio con su Turbina eólica en el año de 1887 [5], el cual dio rienda suelta a nuevas invenciones siguiendo el mismo principio, sin embargo, siguen adecuándose a una altura baja a comparación del BAT.

Se convierte en un blanco de estudio el Parque Eólico Villonaco, siendo el más importante en el Ecuador por su alto impacto y rendimiento, además, nos proporcionara basta información sobre el aerogenerador convencional.

El proyecto de investigación, nos adentrará a temas los cuales son importante para un Ingeniero Eléctrico, conocer, analizar, entender el funcionamiento de nuevas tecnologías y su manera de aprovechar el entorno en el que se sitúan.

Citando una vez más a Nikola Tesla - el padre de la corriente alterna - “I am trying to awake the energy contained in the air. These are the main sources of energy. What is considered as empty space is just a manifestation of matter that is not awakened” [6]. “Estoy intentando despertar la energía contenida en el aire. Estas son las principales fuentes de energía. Lo que se considera espacio vacío es solo una manifestación de materia que no está despierta.”, el campo de la electricidad es basto y lleno de temas que esperan ser descubiertos por Ingenieros Eléctricos, dispuestos a inventar, apostar por mejorar y hacer que la humanidad avance.

### **2.1.Situación Problemática**

El rendimiento de los aerogeneradores convencionales y de la turbina Aerodinámica BAT, representa una problemática clave en los sistemas eólicos, factores de la velocidad del viento y altura toman especial relevancia en esta comparación.

Aunque la energía eólica aún no constituye una parte principal en el conjunto de generación eléctrica, se distingue por su presencia constante en ciertas áreas, lo que la hace una opción viable y sostenible. Por lo tanto, mejorar su utilización a través de tecnologías más efectivas podría permitir maximizar su capacidad y ayudar de manera importante al aumento de la producción eléctrica renovable.

Uno de los principales desafíos de este estudio es la falta de un prototipo de BAT que tenga un largo periodo de funcionamiento para obtener datos reales de generación, sin embargo, está basada en los estudios realizados e investigación, para conocer el  $C_p$  del BAT.

### **2.2.Formulación del problema**

El aerogenerador tradicional no logra su máximo rendimiento o acercarse al límite de Betz bajo ciertos escenarios operativos y ello requiere la búsqueda de tecnologías que puedan aprovechar de mejor manera la velocidad del viento, y aumentar la generación eléctrica, en un lugar determinado.

## **2.3. Objeto y Campo de acción**

### **2.3.1. Objeto de Investigación:**

Aerogeneradores

### **2.3.2. Campo de Acción**

3322.09 Compresores y Turbinas

3322.02 Generación de Energía

2322.03 Generadores de Energía

## **2.4. Beneficiarios**

### **2.4.1. Directo**

El proyecto de investigación presentada trae principalmente ventajas al ámbito energético o empresas dedicadas a la generación y distribución de energía eléctrica, que deseen adoptar un enfoque sostenible en la producción de energía eléctrica. Al enfocarse en alternativas innovadoras como el BAT, este trabajo ayuda a ampliar el conocimiento en energías renovables con alto rendimiento, abriendo nuevas oportunidades para estudios y proyectos relacionados con la ingeniería energética, sostenibilidad y transición en el sector energético. Además, los hallazgos pueden ser utilizados como fundamento técnico y académico para futuras implementaciones en áreas rurales o de difícil acceso, donde las soluciones tradicionales enfrentan obstáculos logísticos y económicos.

### **2.4.2. Indirecto**

Las personas quienes pueden tomar ventaja del proyecto de investigación, es la comunidad universitaria quienes pueden tomarla como punto de partida para el análisis de energías renovables o mejora de sistemas convencionales, de igual manera, para personas que no tienen un nivel de estudio situado en ingeniería pero que tiene curiosidad sobre nuevas formas de desarrollo energético.

## **2.5. Justificación**

La investigación en curso se centra en la mejora de los métodos convencionales de producción de energía renovable, no solo para aumentar su rendimiento, sino también

para explorar opciones tecnológicas innovadoras que faciliten una transición energética más sostenible y adaptada a los retos actuales.

Un elemento clave de este estudio es la variabilidad en las fuentes de producción de electricidad, con el objetivo de reducir la dependencia de un solo sistema. Esta táctica ayuda a minimizar riesgos, refuerza la capacidad de respuesta del sistema energético y asegura un suministro más seguro. En este marco, la adopción de tecnologías innovadoras, como el almacenamiento de energía de última generación o la integración de distintos sistemas, resulta esencial para mejorar la utilización de recursos renovables.

Fomentar el progreso tecnológico en este ámbito, incentivando la búsqueda de métodos adicionales y diferentes que superen las limitaciones actuales. De esta manera, se puede lograr desarrollar una nueva vía de energía sostenible y adaptable a zonas difíciles de proveer energía.

La intención es generar en la comunidad académica y en la sociedad en su conjunto una curiosidad que transforme, alentándoles a cuestionar lo convencional, investigar nuevas metodologías y arriesgarse a innovar, planteando la idea de que la energía pueda ser un recurso abundante y no una limitación, sino un medio para un desarrollo sostenible y accesible. Para alcanzar esto, requiriendo más que avances en tecnología; necesitan individuos críticos, creativos y colaborativos que pongan en duda los estándares establecidos.

## **2.6. Objetivos**

### **2.6.1. General**

Evaluar el rendimiento de la turbina aerodinámica tipo BAT en comparación con los aerogeneradores tradicionales, a través de la investigación y análisis comparativo, para determinar la viabilidad de su aplicación.

### **2.6.2. Específicos**

- Investigar el funcionamiento de la Turbina Aerodinámica - BAT.
- Comparar el rendimiento del BAT a diferentes alturas y velocidades del viento.
- Comparar los resultados de rendimiento del BAT con el generador convencional del Parque Eólico Villonaco.

## 2.7. Sistema de Tareas

Tabla 3. Sistema de tareas

Objetivos específicos	Actividades (tareas)	Resultados esperados	Técnicas, Medios e Instrumentos
Investigar el funcionamiento de la Turbina Aerodinámica - BAT	Identificar los componentes del BAT	Compresión del principio de funcionamiento del BAT y sus características	Investigación con portátil.
	Investigar el funcionamiento del BAT		
Comparar el rendimiento del BAT a diferentes alturas y velocidades del viento	Calcular la velocidad del viento a diferentes alturas	Determinación del comportamiento y la potencia generada por el BAT.	Cálculos, Portátil.
	Calcular de manera teórica la potencia generada por el BAT		
Comparar los resultados del rendimiento del BAT con el generador convencional del Parque Eólico Villonaco	Investigar las características del aerogenerador convencional del Parque eólico Villonaco	Identificación del sistema de generación con mayor rendimiento en el mismo entorno.	Investigación, Portátil
	Revisar los resultados del rendimiento del aerogenerador convencional y el BAT		
	Comparar el rendimiento del aerogenerador convencional y el BAT		

### **3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA**

#### **3.1. El viento**

Los vientos naturales son movimientos de aire ocasionados por diferencias de presión atmosférica causados por variaciones en la temperatura del aire. El flujo de aire de una zona de alta presión a una de baja presión, así como la velocidad del viento, dependen de la magnitud de la diferencia de presiones entre ambas zonas. La velocidad del viento, tanto en magnitud como en dirección, proviene de la velocidad inducida por la diferencia de presiones, así como la velocidad originada por el efecto del arrastre de las capas de aire en la superficie debido a la rotación del planeta. La velocidad de giro de la superficie del planeta varía desde 1.600 km/h aproximadamente en el ecuador hasta prácticamente cero en los polos, es por esto que la velocidad del viento varía tanto con la latitud. La velocidad del viento y su dirección varían en un lugar determinado a lo largo del tiempo, siendo el cambio en la dirección de éste lo que conserva un patrón de comportamiento más estable. En condiciones estables, existen continuamente dos cinturones de alta presión alrededor del planeta, uno entre los 30 grados Norte y los 40 grados Norte y el otro entre los 30 y los 40 y además existe un cinturón de baja presión en la zona del ecuador, entre los cinturones de alta presión, lo cual origina un continuo flujo de aire de los hemisferios norte y sur hacia el ecuador. Debido al efecto de rotación de la Tierra, en las zonas tropicales las corrientes de aire provenientes de ambos hemisferios hacia el ecuador se convierten, en el caso del hemisferio norte en vientos del noreste y en el caso del hemisferio sur en vientos del sureste. Asociados con este sistema de vientos existen persistentemente vientos del oeste en latitudes entre los 40 grados y los 60 grados de latitud en ambos hemisferios. Despreciando los disturbios ocasionados por tormentas sobre las corrientes normales de aire, existen ciertas tendencias bien definidas en la dirección del viento en los cinturones mencionados. Los servicios meteorológicos alrededor de todo el mundo realizan continuas mediciones de la presión atmosférica con el fin de poder construir cartas de presión atmosférica o isobáricas en cualquier momento. Las isobáticas son líneas que unen puntos o lugares cuya presión atmosférica es la misma al nivel del mar y se corrigen de acuerdo a la temperatura y a la latitud. A partir de las isobáticas, el "gradiente de viento", es decir, la velocidad del viento debido a la diferencia de presión, puede ser calculado, pero debido a la fricción y a efectos de la temperatura local a bajas altitudes, este cálculo de la velocidad no es en general actualmente obtenido por abajo de alturas de 500 m. Cuando se considera al viento como fuente energética, no

se consideran por supuesto los vientos en grandes altitudes, sino aquellos que se encuentran entre los 0 y 60 metros sobre el nivel del suelo. Estos vientos superficiales, con los cuales las máquinas de viento operan, son fuertemente afectados por la topografía del lugar en el cual son instalados los equipos, así como por construcciones, árboles, rocas o, de hecho, cualquier cosa que obstruya o disturbe el flujo de aire. El poder del viento depende principalmente de su velocidad; si existen factores afectando la velocidad del viento en el lugar de colocación del aerogenerador, la eficiencia del mismo será muy variable. La dirección del viento no es tan importante en la localización de la máquina a excepción de que existan serias obstrucciones en la dirección general del viento prevaleciente en el lugar, por lo que será mejor relocalizar su sitio de colocación. [7]

Al tener en cuenta la información de la investigación desarrollada, se tiene como representación la **Figura 1**, la cual indica el proceso del aire de ascenso, descenso y su influencia en el mismo, durante el día, y en la **Figura 2**, el mismo proceso, pero durante la noche.

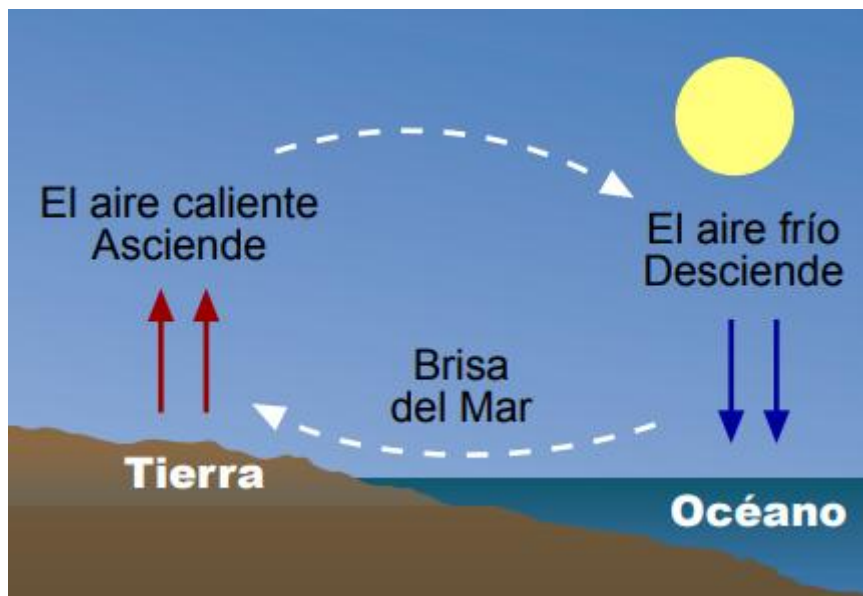


Figura 1. Proceso del aire en el día [8]

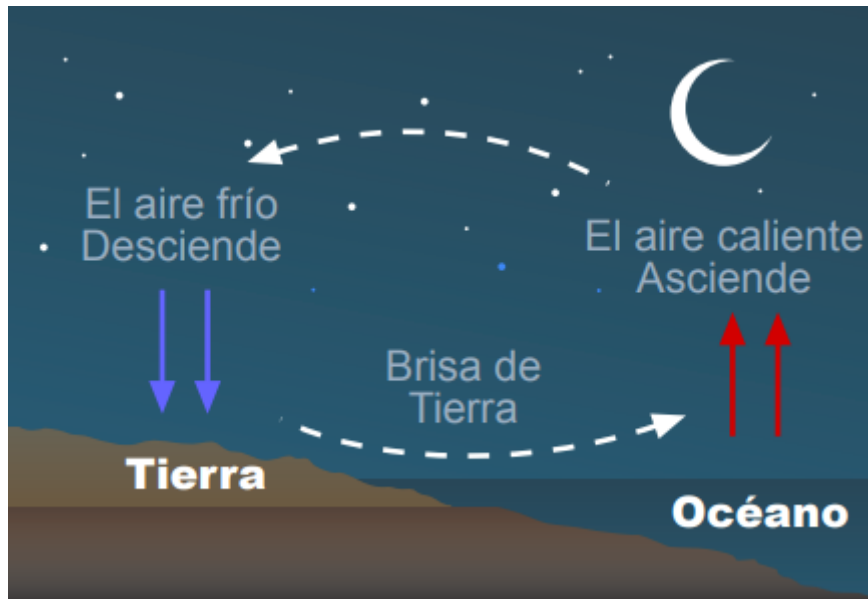


Figura 2. Proceso del aire en la noche [8]

### 3.1.1. Relación entre la Altura y Velocidad del viento.

#### Texto con traducción

- El viento es una función del cambio de presión atmosférica a lo largo de una distancia horizontal. Cuanto más rápido cambie la presión a lo largo de una distancia horizontal (lo que se conoce como gradiente de presión), más fuerte será el viento. La presión atmosférica y la temperatura también están relacionadas. A medida que la temperatura cambia, la presión también cambia. En otras palabras, las diferencias bruscas de temperatura a lo largo de una distancia horizontal también provocan cambios bruscos de presión y velocidades del viento más intensas. A medida que aumenta la altitud, los gradientes de temperatura y presión también tienden a aumentar. Esto se debe, en parte, a que las masas de aire en altura se ven menos afectadas por el terreno y el calentamiento solar de la superficie terrestre. Además, a medida que aumenta la altitud, la densidad del aire disminuye. El aire menos denso puede desplazarse con mayor facilidad, lo que puede resultar en vientos más rápidos. [9] -

### 3.1.2. Relación de la Fricción y Velocidad del viento

#### Texto con traducción

- En la superficie terrestre, los cambios de terreno, la cobertura arbórea, la vegetación e incluso los edificios actúan como barreras eólicas que reducen la velocidad del viento. Esto se conoce como fricción superficial. A medida que aumenta la altitud, hay menos

fricción que frene la velocidad del viento. Si imaginamos una línea horizontal invisible a una altitud de 3.650 metros en el oeste de Estados Unidos, por ejemplo, existe una cantidad limitada de terreno montañoso a esta altitud y por encima de ella, y, por lo tanto, hay menos fricción que frene los vientos, en comparación con los 1.820 metros, donde la fricción superficial es significativamente mayor. El mismo ejemplo se aplica a cualquier cordillera. Se considera, por ejemplo, las Montañas Blancas de Nuevo Hampshire, donde el terreno es limitado por encima de los 1524 metros y, por lo tanto, estas zonas están más expuestas a vientos fuertes debido a la menor fricción en comparación con el terreno circundante de menor altitud. [9]-

El valor de rugosidad del terreno está determinado por las diferentes superficies, descritas en la **Tabla 4**, la cual hace referencia al tipo de terreno y el valor de rugosidad que tiene en diferentes entornos.

Tabla 4. Valor de rugosidad [10]

<b>Clase de rugosidad</b>	<b>Longitud de rugosidad (m)</b>	<b>Índice de energía (%)</b>	<b>Tipo de terreno</b>
0	0,0002	100	Superficie de agua, terreno abierto, superficie lisa
0,5	0,00024	73	Pistas de hormigón (aeropuertos), césped
1	0,03	52	Campos abiertos sin cercados ni setos, edificios muy dispersos, colinas suaves
1,5	0,055	45	Campo con algunas casas y arbolado de hasta 8 m, situado como mínimo a 1250 m
2	0,1	39	Campo con algunas casas y arbolado de

			hasta 8 m, situado como mínimo a 500 m
2,5	0,2	31	Campo con algunas casas y arbolado de hasta 8 m, situado como mínimo a 25 m
3	0,4	24	Pueblos, bosques y terreno accidentado y desigual
3,5	0,8	18	Ciudades con edificios altos
4	1,6	13	Grandes ciudades con edificios muy elevados

Otro factor muy a tener en cuenta y que afecta a la velocidad final del viento es el incremento del mismo cuanto mayor es la altitud. Esto ocurre por la acción del rozamiento de las masas de aire a grandes alturas, que conforme se va descendiendo y se aproxime a la superficie terrestre, se irá reduciendo por la acción de otros factores como los obstáculos presentes en el terreno. Según la altitud a la que se encuentre, el viento verá afectada su velocidad en mayor o menor medida por unos factores u otros, cuya acción se puede clasificar en tres capas o rangos de altura tal y como se aprecia en la **Figura 3** (Inglés) y **Figura 4** (español):

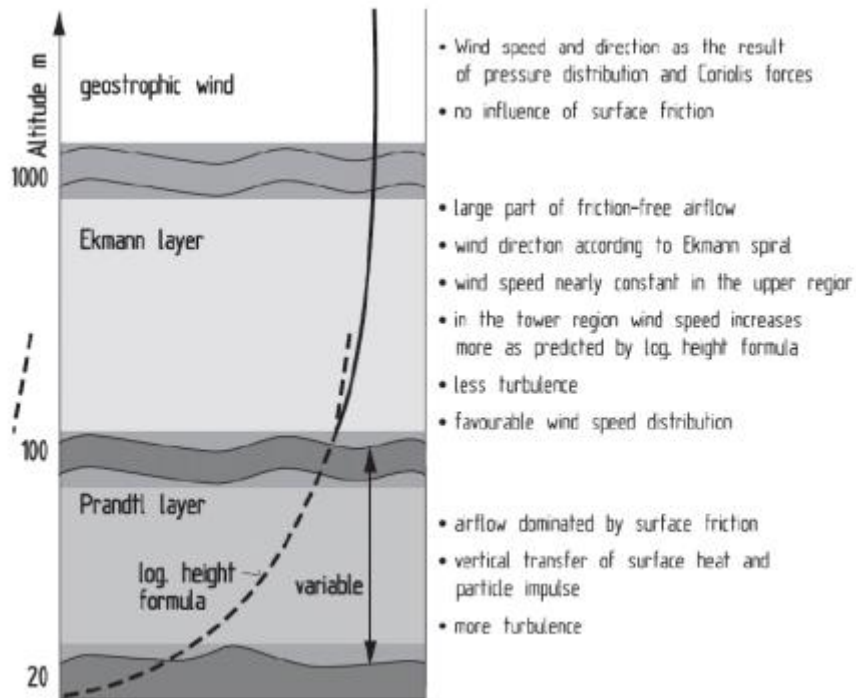


Figura 3. Comportamiento del viento - Inglés

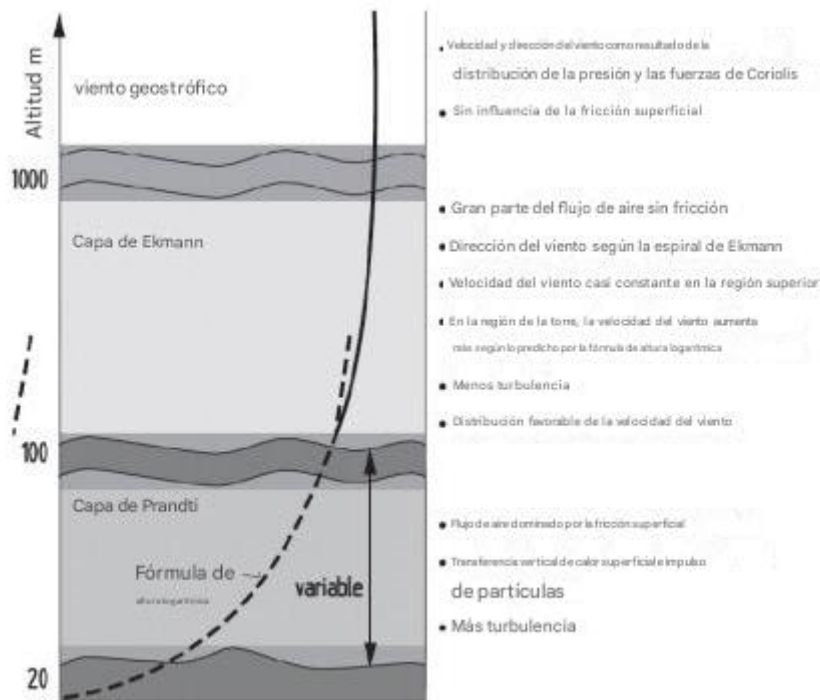


Figura 4. Comportamiento del viento - Español

### 3.1.3. Extrapolación de Viento a diferentes alturas

Texto con traducción

- La extrapolación de la velocidad del viento a diferentes alturas se refiere a la estimación de la velocidad del viento a una altura diferente de la que se ha medido. Esto es útil para determinar el potencial eólico a diferentes alturas y para el diseño de aerogeneradores, entre otras aplicaciones. Se utilizan diversos modelos matemáticos para realizar esta extrapolación, como la ley de potencia y la ley logarítmica, que tienen en cuenta factores como la rugosidad del terreno y la altura sobre el nivel del suelo. [11] –

A continuación, se presenta la **Ecuación 1**, en donde se relaciona la extrapolación de la determinación de la velocidad a otra altura, tomando como referencia una altura y velocidad del viento conocida.

$$V2 = V1 * \left(\frac{h2}{h1}\right)^\alpha \quad (1)$$

Donde:

- $V2$ : es la velocidad del viento que se quiere calcular
- $V1$ : es la velocidad del viento conocida
- $h2$ : la altura a la que se quiere calcular la velocidad
- $h1$ : la altura conocida
- $\alpha$ : exponente que depende de la rugosidad

### 3.2. Límite de Betz

El Límite de Betz es un concepto utilizado en la industria de la energía eólica, estableciendo la eficiencia máxima teórica con la que un aerogenerador puede convertir la energía cinética del viento en energía eléctrica. Según este principio, formulado por el físico alemán Albert Betz en 1919, no se puede capturar más del 59.3% de la energía cinética del viento. Este límite se debe a la necesidad de mantener un flujo de viento a través del aerogenerador; si todo el viento fuera detenido para extraer su energía, no podría pasar a través del rotor, lo que detendría el movimiento de las aspas y, por ende, la generación de energía. La eficiencia de un aerogenerador se mide dividiendo la potencia eléctrica generada por la potencia eólica entrante, lo que nos permite evaluar qué tan cerca está un aerogenerador de alcanzar este límite teórico. En la práctica, los aerogeneradores modernos logran entre el 35% y el 45% de esta eficiencia debido a factores como la resistencia aerodinámica de las aspas, las pérdidas mecánicas y eléctricas, y las condiciones variables del viento. Para optimizar el rendimiento de un

aerogenerador dentro de los límites establecidos por Betz, se consideran varios factores en su diseño, como el ángulo de ataque de las aspas, la velocidad de rotación del rotor, la eficiencia del generador eléctrico y la efectividad del sistema de control. Estos componentes deben trabajar en conjunto para transformar la energía cinética del viento en electricidad de manera eficiente. [12]

### 3.3. Densidad del aire

#### Texto traducido

- La densidad del aire es la masa por unidad de volumen y, al igual que la presión atmosférica, disminuye al aumentar la altitud. También varía con la variación de la presión atmosférica, la temperatura y la humedad. La densidad del aire se utiliza en muchas ramas de la ciencia, la ingeniería y la industria. [13]-

La **Tabla 5**, contiene la información de la temperatura, presión y densidad a diferentes alturas sobre el nivel del mar (msnm).

Tabla 5. Densidad del aire respecto a la altura

Altitud msnm (m)	Temperatura (°K)	Presión (KPa)	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )
0	288,2	101,3	1,125
500	284,9	95,43	1,167
1000	281,7	89,85	1,112
2000	275,2	79,48	1,007
4000	262,2	61,64	0,81194
6000	249,2	47,21	0,6602
8000	236,2	35,65	0,5258
10000	223,3	26,49	0,4136
12000	216,7	19,4	0,3119
14000	216,7	14,17	0,2278
16000	216,7	10,35	0,1665
18000	216,7	7,563	0,1216
20000	216,7	5,528	0,0889

30000	226,5	1,196	0,0184
40000	250,4	0,287	0,004
50000	270,7	0,0789	0,00103
60000	255,8	0,0225	0,000306
70000	219,7	0,00551	8,75E-05
80000	180,7	0,00103	0,00002

### 3.4. Fórmula de Potencia

La potencia de salida del aerogenerador depende de tres factores principales: la velocidad del viento, el área de barrido de las aspas del rotor y el coeficiente de potencia [14], se relacionan estos factores en la **Ecuación 2**, a continuación:

$$P = \frac{1}{2} * \rho * A * C_p * v^3 \quad (2)$$

Donde:

- $P$ : Potencia de salida del aerogenerador
- $A$ : Es el área de barrido de las aspas, se calcula con:

$$\circ A = \pi * r^2 \quad (3)$$

- $\frac{1}{2}$ : Este factor representa la mitad de la energía cinética del viento, ya que un aerogenerador solo puede capturar una fracción de la energía total del viento.
- $\rho$ : Densidad del aire
- $C_p$ : Coeficiente de potencia
- $v^3$ : velocidad del viento

### 3.5. Rendimiento de un Generador

El rendimiento de un generador, expresado con la letra griega  $\eta$  (eta), es la relación entre la potencia de salida útil (la que se entrega a la carga) y la potencia de entrada (la que requiere el generador para funcionar). En otras palabras, mide cuán eficiente es un generador al convertir energía mecánica en energía eléctrica. [14]

La representación de esta relación se expresa en la **Ecuación 4**, a continuación:

$$\eta = (\text{Potencia de salida}/\text{Potencia de entrada}) * 100\% \quad (4)$$

El cálculo del rendimiento nos permite conocer el aprovechamiento real que se puede tener de un aerogenerador, se debe tener en cuenta que no se puede llegar al 100% debido a las pérdidas mecánicas, eléctricas y la constancia del viento.

### **3.6. Turbina Aerodinámica BAT**

#### **3.6.1. Historia del BAT**

Ben Glass desarrolló una idea original para la turbina aerotransportada flotante (BAT, un tipo de turbinas eólicas aerotransportadas) mientras investigaba turbo maquinaria compacta y eficiente como parte de su trabajo en el Laboratorio de Turbinas de Gas del Instituto Tecnológico de Massachusetts. Después de desarrollar y probar los prototipos iniciales del aerostato toroidal, Glass y Adam Reinco fundaron la empresa privada Altaeros Energies, Inc. en abril de 2010 en Somerville, Massachusetts. Originalmente, su objetivo era desarrollar la primera turbina eólica aerotransportada comercial del mundo. Altaeros later estableció un centro de investigación y desarrollo (R&D) en Fremont, New Hampshire. El argumento comercial de la MTD se basó en el hecho de que los vientos predominantes son más fuertes a mayor altitud y ofrecen más energía para la recolección (mayor densidad de energía) que a nivel del suelo. Esta es la razón de la tendencia hacia el viento estacionario más alto y de mayor diámetro turbinas que pueden recolectar energía de los vientos a altitudes de hasta aproximadamente 300 m (984 pies). Altaeros estimó que su aerostato atado a BAT podría producir de dos a cinco veces más energía que una turbina comparable en una torre de 350 pies (107 metros) de altura en el mismo lugar. [15], por lo cual se tiene la en la **Figura 5**, se aprecia, la comparativa en cuanto a la altitud de operación aerogenerador tradicional y el BAT. [15]

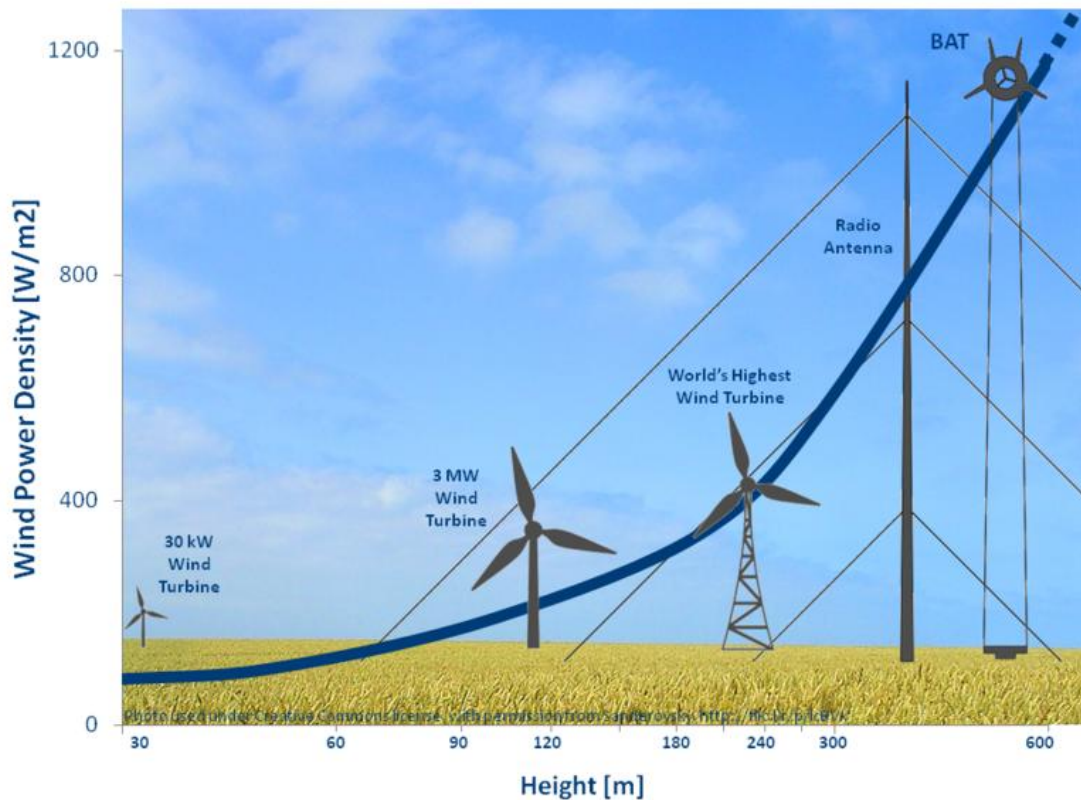


Figura 5. Comparación de alturas Aerogenerador – BAT

### 3.6.2. Partes del BAT

#### Texto con traducción

- El Altaeros BAT integra tecnología aeroespacial y de turbinas eólicas de eficacia probada. La plataforma elevadora del BAT es una adaptación de los aerostatos cautivos, que han elevado de forma fiable equipos pesados de comunicaciones y monitorización durante décadas. El Altaeros BAT integra cuatro componentes principales:

- **Carcasa:** una carcasa patentada llena de helio fabricada con tejidos industriales de alto rendimiento que eleva la turbina y la estabiliza en el aire.
- **Turbina:** Una turbina eólica convencional ligera, de tres aspas y eje horizontal, fijada dentro de la carcasa.
- **Amarres:** Los amarres livianos y de alta resistencia sostienen la turbina en su lugar en todas las condiciones climáticas y transmiten energía al suelo.
- **Estación terrestre:** la estación terrestre portátil se despliega rápidamente desde un contenedor de envío e incluye un sistema de control autónomo y un equipo de acondicionamiento de energía. [15]-

La **Figura 6** (Inglés) y **Figura 7** (Español), contiene la información de las partes del BAT, a continuación:

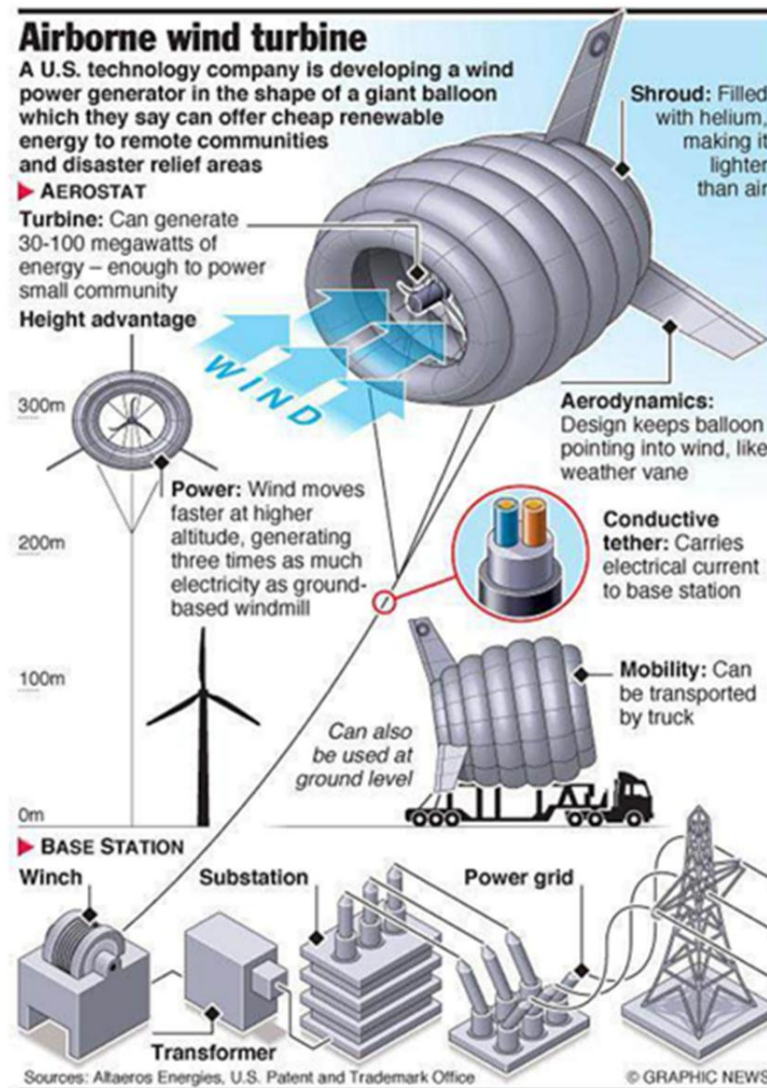


Figura 6. Partes del BAT – Inglés

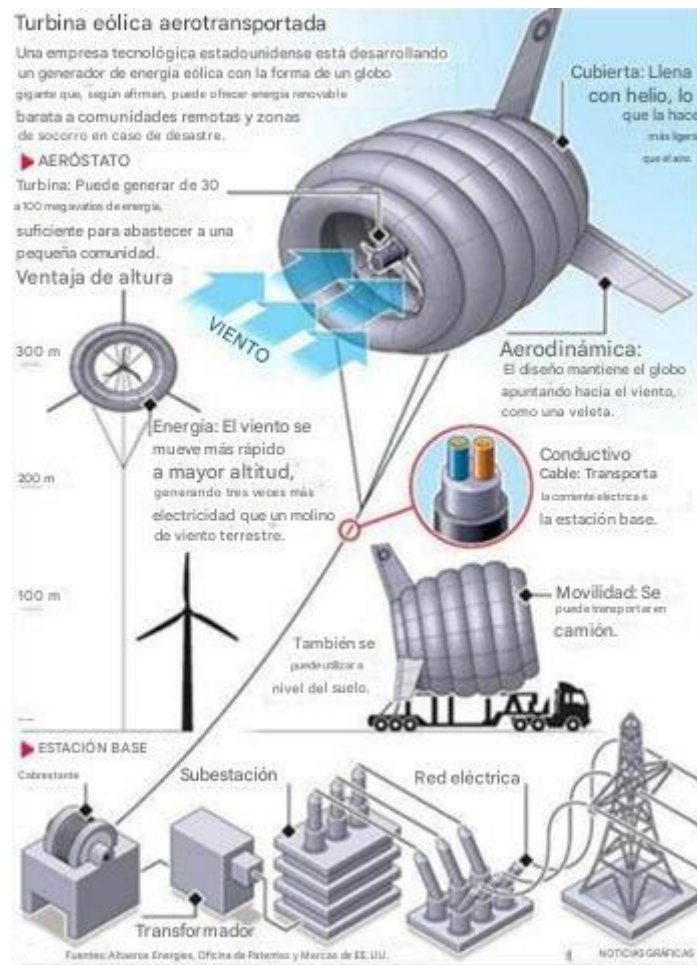


Figura 7 Partes del BAT – español

### 3.6.3. Funcionamiento del BAT

- **Potencia de alta capacidad:** Operando hasta 600 metros, el Altaeros BAT genera más del doble de energía que aerogeneradores de torre de potencia similar. La potencia generada por los vientos de gran altitud es uniforme, constante y fácil de integrar en sistemas de energía remotos existentes.
- **Ubicación e impacto:** Altaeros BAT facilita el acceso a energía eólica de bajo coste a emplazamientos con vientos terrestres de baja intensidad o con dificultades logísticas. Además, minimiza el impacto humano y ambiental en comparación con los aerogeneradores convencionales montados en torre.
- **Operaciones automatizadas y confiables:** Los controles autónomos optimizan la generación de energía y gestionan el atraque de equipos para protegerlos durante condiciones climáticas adversas. La turbina opera continuamente sin personal y puede monitorearse remotamente, lo que requiere revisiones periódicas de mantenimiento según el equipo remoto existente.

- **Bajo costo:** El Altaeros BAT reduce el segundo mayor costo de la energía eólica —el costo de instalación y transporte— hasta en un 90%, gracias a su implementación en contenedores que no requiere torre, grúa ni cimentación de cemento. Combinado con aumentos significativos en la producción energética y opciones de implementación flexibles, el BAT está diseñado para reducir significativamente el costo normalizado de la energía para los clientes remotos.
- **Movilidad y despliegue rápido:** El Altaeros BAT se envía en dos contenedores estándar y puede instalarse y producir energía en menos de veinticuatro horas. Su fácil transporte, instalación y reubicación ofrece una movilidad inalcanzable con las turbinas eólicas de torre.
- **Ingresos adicionales por servicios aéreos:** Al igual que otros aerostatos cautivos, el Altaeros BAT puede transportar equipos adicionales de comunicación, vigilancia y sensores junto a la turbina para brindar servicios adicionales a sitios remotos. El BAT proporciona una línea de visión de más de 96 kilómetros en cualquier dirección, ofreciendo una plataforma potente que las torres fijas no pueden alcanzar. La adición de equipos de carga útil no afecta la estabilidad ni la potencia de salida del sistema. [16]

#### 3.6.4. Prototipo del BAT - Altaeros

El prototipo Altaeros BAT de 30 kW para las pruebas de Alaska fue diseñado para operar a una altitud de 1.000 pies (308 m), **Figura 8**. Un prototipo de BAT había sido probado operativamente en la costa este de Estados Unidos con vientos de 45 mph (70 kph), pero se esperaba que fuera capaz de soportar ráfagas más fuertes que probablemente se encontrarían en Alaska, hasta 100 mph (161 kph). [15]

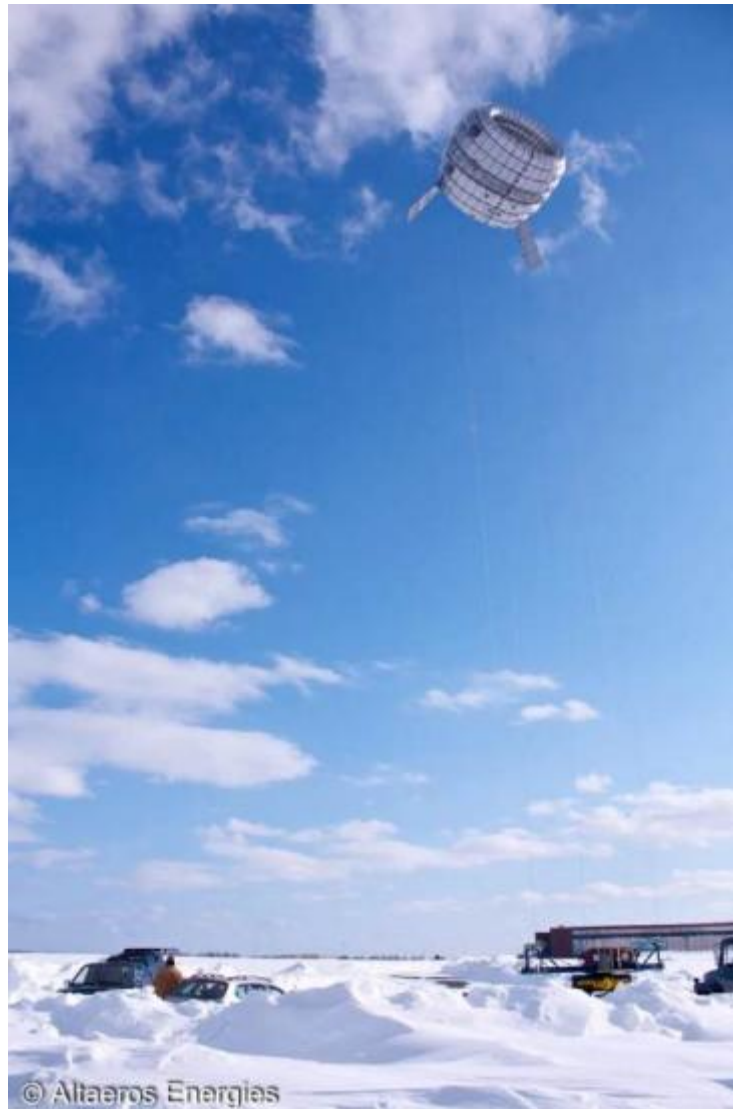


Figura 8. Prototipo del BAT – Altaeros

Se esperaba que el sistema MTD tuviera las siguientes características:

**Operación autónoma, que incluye:** Optimización de la altitud y el cabeceo del aerostato, **Figura 9**, para recolectar eficientemente la energía eólica disponible, y Recuperación y acoplamiento del aerostato cuando se detecta una tormenta severa en las cercanías y luego redespigue del aerostato cuando las condiciones mejoren. [15]

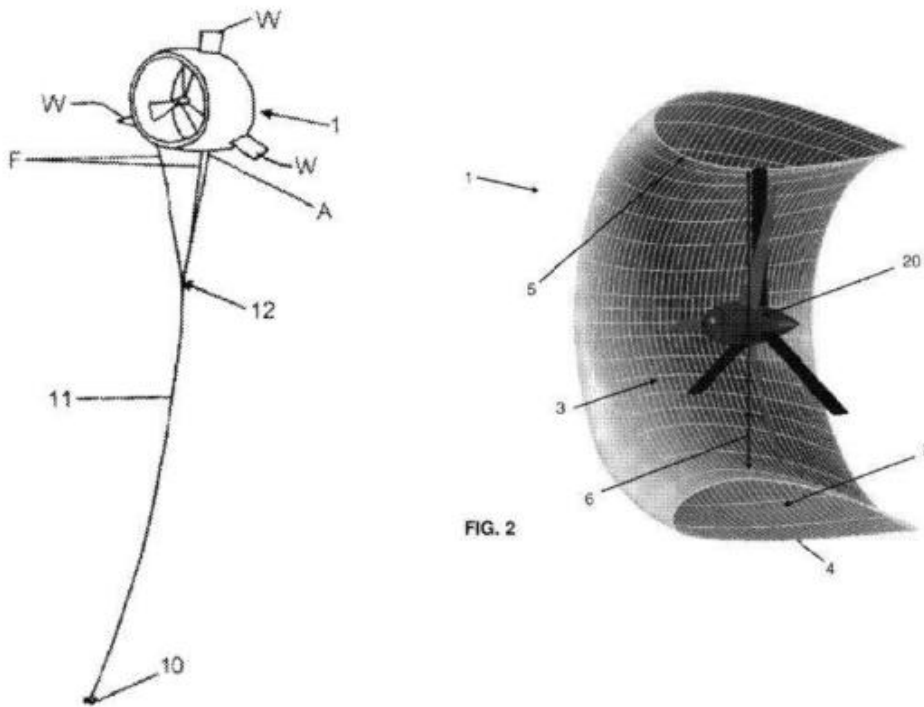


Figura 9. Diseño de BAT – Altaeros

**Mantenimiento periódico:** Solo se desplegarían especialistas en el sitio para rellenar periódicamente el helio y realizar un mantenimiento de rutina, **Figura 10**, para una revisión. La turbina eólica seleccionada por Altaeros para el ensayo AEA se describió como "convencional" y no específicamente calificada para las condiciones del Ártico. En Alaska, la Northern Power Systems 100, una popular turbina eólica de 100 kW construida para climas fríos y duros, es capaz de funcionar en condiciones tan bajas como  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  (también  $-40\text{ }^{\circ}\text{F}$ ). La capacidad de la MTD de Altaeros para operar en condiciones árticas será un resultado importante de la prueba AEA. Se esperaba que este proyecto llevara el desarrollo de MTD al TRL-6: "Demostración de modelo o prototipo de sistema/subsistema en un entorno relevante". [15]



Figura 10. Mantenimiento del BAT

Aproximadamente un año después del inicio de los trabajos en el proyecto NSF SBIR Fase II, Altaeros tomó la decisión corporativa a finales de 2015 de interrumpir su trabajo en el BAT. Esto dio lugar a una importante redefinición del alcance del trabajo del proyecto, que se resume a continuación:

"Durante el transcurso de este proyecto de Fase II/IIB, Altaeros cambió su enfoque comercial principal del desarrollo de una turbina eólica flotante en el aire al desarrollo y comercialización de una plataforma de telecomunicaciones aérea, llamada SuperTower, que puede reemplazar una red de 15 torres celulares regulares para proporcionar conectividad asequible y de alta velocidad a comunidades rurales de todo el mundo. Altaeros presentó un cambio de alcance en diciembre de 2015, después de lo cual el proyecto de la Fase II se centró en promover el estado de la tecnología de aerostatos autónomos a través de la demostración de una plataforma de aerostatos automatizada en condiciones del mundo real. [15]

**3.6.5. Prototipo de BAT - Beijing Linyi Yunchuan Energy Technology Co. Ltd, Universidad de Tsinghua, Instituto de Aeronáutica y Astronáutica de la Academia de Ciencias de China y otras instituciones de investigación científica**

**Texto traducido**

- En octubre de 2024, varias fuentes de noticias chinas informaron que la empresa Beijing Linyi Yunchuan Energy Technology Co. Ltd, en colaboración con la Universidad de Tsinghua, el Instituto de Aeronáutica y Astronáutica de la Academia de Ciencias de China y otras instituciones de investigación científica, había desarrollado y volado una turbina de aire flotante (BAT), conocida en China como el "Sistema de energía eólica flotante estratosférica" S500 (SAWES). que era capaz de generar 50 kW de energía eléctrica [17],

**Figura 11. -**



Figura 11. Aerostato S500 SAWES atado y su estación base

### **Texto con traducción**

- Un BAT, o SAWES, es un aerostato atado (un globo cometa) que puede levantar un generador liviano en los vientos más fuertes de gran altitud y entregar energía eléctrica a través de su correa a una estación terrestre y luego a una subestación eléctrica para una microrred local, o a la red misma. Esto se puede lograr sin el hardware masivo asociado con las turbinas eólicas terrestres ubicadas en tierra o en alta mar. Funcionalmente, el SAWES chino es similar al BAT de Altaeros Energies, cuyas versiones se desarrollaron y probaron en los EE. UU. de 2010 a 2015, pero no se convirtieron en un sistema desplegable comercialmente. [17] -

### **3.6.6. SIERRAS S500**

### Texto con traducción

- El S500 SAWES de producción nacional china lleno de helio tiene 23 metros (75,5 pies) de largo y 15 metros (49,2 pies) de diámetro. Una turbina eólica de dos aspas con aspas de 2,4 m (7,9 pies) está instalada en un conducto de 5 m (16,4 pies) de diámetro a lo largo del eje longitudinal del S500, **Figura 12**. A velocidades de viento superiores a 7 m/s (15,6 mph), la turbina eólica impulsa un generador liviano con una capacidad nominal de más de 50 kW. [17]-



Figura 12. Sierra S500

### Texto con traducción

- El 11 de octubre de 2024, se realizó una prueba de vuelo con el S500, **Figura 13**, ascendiendo durante 10 minutos a su altitud operativa de 500 metros (1.640 pies) sobre el suelo en Wuhan, en la provincia central china de Hubei. Durante esta prueba, el S500 demostró que podía generar más de 50 kW de potencia. [17]-



Figura 13. BAT en vuelo

### 3.6.7. Sierra S1000

#### Texto con traducción

- En enero de 2025, Beijing Linyi Yunchuan Energy Technology Co. demostró que sus SAWES S1000, **Figura 14**, más grandes volaban a una altitud de 1.000 metros (3.281 pies) sobre la Base de Investigación y Pruebas de Modelos del Lago Poyang en la ciudad de Gongqing en la provincia de Jiangxi, en el este de China. Science & Technology Daily informó:

"El sistema de generación de energía eólica flotante S1000 con un diámetro de 15 metros (49,2 pies) y una longitud total de unos 30 metros (98,4 pies) despegó lentamente. Después de escalar durante unos 15 minutos, alcanzó con éxito la altura de prueba y flotó de manera estable". .....” Durante el vuelo de prueba, la potencia generada superó los 100 kilovatios".

En comparación con el S500, el S1000 tiene el mismo diámetro máximo de 15 metros (49,2 pies), es 7 metros (23 pies) más largo, opera a una altitud más alta y tiene una cola anular más grande y reconfigurada. [17]-



Figura 14. Sierra S1000

### 3.6.8. Coeficiente de Potencia CP

#### Texto con traducción

- Los sistemas AWES ofrecen varias ventajas sobre las turbinas eólicas terrestres tradicionales. Principalmente, los sistemas aerotransportados pueden alcanzar mayores altitudes donde el viento suele ser más fuerte y constante, lo que se traduce en una mayor producción de energía. Esto se ve respaldado por el hecho de que los AWES tienen como objetivo aprovechar la energía eólica más allá de la altitud de los molinos de viento tradicionales en vientos más fuertes y constantes utilizando alas atadas. Además, se proporciona una reducción sustancial de la masa en comparación con las turbinas eólicas convencionales, lo que potencialmente resulta en eficiencias económicas. Estas ventajas posicionan a los AWES como una tecnología prometedora para el futuro de la generación de energía eólica. [18]–

#### Texto con traducción

- Se desarrollaron y fabricaron un prototipo de turbina eólica aerotransportada de eje horizontal (HAWT), cuyo rotor está alojado en una carcasa llena de helio y se eleva mediante un globo esférico. El prototipo se probó en condiciones de campo a diversas

altitudes. La turbina generó 250 W a una velocidad media del viento de 6 m/s, con un coeficiente de potencia ( $C_p$ ) de 0,25. [18]-

## 4. MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

### 4.1. Metodología

- **Metodología cuantitativa descriptiva:** Analiza características de un fenómeno, en este caso alturas, velocidad del viento y rendimiento.
- **Metodología cuantitativa correlacional:** Analiza la relación entre variables, en este caso la velocidad del viento a ciertas alturas.
- **Metodología cuantitativa experimental:** Analiza efectos realizados con la modificación de una variable, en este caso la longitud de las aspas del aerogenerador.

### 4.2. Softwares utilizados

- **AutoCAD:** El uso de la herramienta permite el modelado del Aerogenerador convencional y BAT, haciendo que las comparaciones sean visuales y fáciles de comprender, **Anexo 1.**
- **Excel:** El uso de la herramienta permite el cálculo óptimo con las fórmulas a utilizar de manera práctica, rápida y eficaz, también permite realizar la comparación gráfica de valores investigados y obtenidos, **Anexo 2.**

### 4.3. Actividades

En referencia a la investigación realizada, se realizó el análisis de rendimiento del BAT en base a la información del Sierra S500, en el cual se tienen las características de diseño. De esta manera el procedimiento utilizado para la investigación se divide en las siguientes actividades, **Tabla 6**

Tabla 6. Actividades a desarrollar

N	Actividad	Desarrollo	Resultado
1	Revisar las características de	1. Revisar las características técnicas:	Datos de construcción

	construcción del Sierra S500.	<ol style="list-style-type: none"> <li>a. Longitud de aspas</li> <li>b. Diámetro del BAT</li> <li>c. Longitud de BAT</li> </ol> <ol style="list-style-type: none"> <li>2. Modelar el BAT en AutoCAD con los datos revisados.</li> </ol>	
2	Investigar sobre el Aerogenerador convencional del Parque Villonaco.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Revisar los datos de operación del Parque Eólico Villonaco</li> <li>2. Registrar los datos de operación y el entorno: <ol style="list-style-type: none"> <li>a. Altura de operación</li> <li>b. Velocidad del viento</li> <li>c. Densidad del viento</li> </ol> </li> <li>3. Revisar las características del aerogenerador convencional del Parque Eólico Villonaco. <ol style="list-style-type: none"> <li>a. Altura del buje</li> <li>b. Longitud de aspas</li> <li>c. Cantidad de aspas: 3 aspas</li> <li>d. Generador: 1.5 MW</li> <li>e. Área de barrido usando la fórmula: <math display="block">A = \pi * r^2 \quad (3)</math> </li> </ol> </li> </ol>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Potencia de salida</li> <li>• Rendimiento del Aerogenerador convencional de Villonaco</li> </ul>

		<p>f. Valor del <math>C_p</math> y compararlo con el límite de Betz, y obtener el rendimiento del valor real del <math>C_p</math>, con la fórmula:</p> $\text{Rendimiento} = \frac{C_p * 100}{\text{Límite de Betz}} \quad (6)$ <p>4. Modelar el aerogenerador convencional en AutoCAD.</p> <p>5. Cálculo de la potencia de salida del Aerogenerador convencional de Villonaco con el uso de la fórmula:</p> $P = \frac{1}{2} * \rho * A * C_p * v^3 \quad (2)$ <p>6. Cálculo del rendimiento del Aerogenerador convencional de Villonaco con el uso de la fórmula:</p> $\eta = \left( \frac{\text{Potencia de salida}}{\text{Potencia de entrada}} \right) * 100\% \quad (4)$	
3	<p>Extrapolar la variación de la velocidad del viento con respecto a la altura</p>	<p>1. Registrar los datos de operación del aerogenerador del Parque Eólico Villonaco</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>a. Altura de operación</li> <li>b. Velocidad del viento</li> <li>c. Rugosidad</li> </ul>	<p>Velocidad del viento a diferentes alturas</p>

		<p>2. Calcular la velocidad del viento a 100m, 200m, 300m, 400m y 500m de altura con la fórmula:</p> $V2 = V1 * \left(\frac{h2}{h1}\right)^\alpha \quad (1)$ <p>3. Registrar los resultados de la extrapolación.</p>	
4	Calcular la potencia de salida del BAT	<p>1. Usar los datos de:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Velocidad del viento extrapolado</li> <li>Densidad de viento</li> <li>Longitud de aspas</li> <li>Área de barrido usando la fórmula:</li> </ol> $A = \pi * r^2 \quad (3)$ <ol style="list-style-type: none"> <li>Valor del Cp y compararlo con el límite de Betz</li> </ol> <p>2. Cálculos de potencia a 65m, 100m, 200m, 300m, 400m, 500m</p>	Potencia de salida a diferentes alturas
5	Cálculo del rendimiento del BAT	<p>1. Cálculo del rendimiento del BAT</p> $\eta = \left(\frac{\text{Potencia de salida}}{\text{Potencia de entrada}}\right) * 100\% \quad (4)$	Rendimiento de la Turbina a diferentes alturas

6	Análisis de rendimiento del Aerogenerador convencional del Parque Eólico Villonaco contra el BAT	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Comparación de alturas de operación</li> <li>2. Comparación de rendimiento</li> <li>3. Análisis de comparación</li> </ol>	Encontrar el sistema con mayor rendimiento en el mismo entorno
7	Cálculo de aspas necesarias para la óptima operación	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Se utiliza la ecuación de potencia para despejar el radio y obtener el resultado esperado: <math display="block">P = \frac{1}{2} * (\pi * r^2) * C_p * v^3 \quad (2)</math> <math display="block">r = \sqrt{\frac{P}{0,5 * \pi * C_p * v^3}} \quad (5)</math> </li> <li>2. Modelar las aspas teóricas calculadas del BAT</li> </ol>	Longitud de aspas requeridas para que el sistema opere de manera efectiva.
8	Calcular la potencia de salida del BAT – aspas calculadas	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Usar los datos de: <ol style="list-style-type: none"> <li>a. Velocidad del viento, del paso 3</li> <li>b. Densidad de viento,</li> <li>c. Longitud de aspas</li> <li>d. Área de barrido usando la fórmula: <math display="block">A = \pi * r^2 \quad (3)</math> </li> <li>e. Valor del Cp</li> </ol> </li> </ol>	Potencia de salida a diferentes alturas

		2. Cálculos de potencia a 65m, 100m, 200m, 300m, 400m, 500m	
9	Cálculo del rendimiento del BAT	1. Cálculo del rendimiento del BAT – aspas calculadas  $\eta = \left( \frac{\text{Potencia de salida}}{\text{Potencia de entrada}} \right) * 100\% \quad (4)$	Rendimiento total del sistema con aspas calculadas.
10	Análisis del Rendimiento del aerogenerador convencional, el BAT, y el BAT con aspas calculadas	1. Comparación de alturas de operación  2. Comparación de rendimiento  3. Análisis de comparación	Encontrar el sistema con mayor rendimiento en el mismo entorno

## 5. ANÁLISIS Y RESULTADOS

### 5.1. Revisar las características técnicas:

Mediante la investigación, se registraron las características de construcción del Modelo Sierra S500, ya que se contó con la mayor parte de los datos para realizar los cálculos pertinentes, **Figura 15**,



Figura 15. Modelo Sierra S500

### Características:

- Largo: 23 metros
- Diámetro: 15 metros
- Longitud de aspas (r): 2,4 metros
- Área de barrido usando la fórmula:

$$A = \pi * r^2 \quad (3)$$

$$A = \pi * (2,4)^2$$

$$A = 18,09 \text{ m}^2$$

- Número de aspas: 2 aspas

En este caso se encontró una diferencia notable en los aerogeneradores y fue la cantidad de aspas, sin embargo, al realizar la investigación se determinó que no existe problema o diferencia en su funcionamiento a comparación de contar con tres aspas, por lo cual, no existió problemas con los cálculos realizados:

### Texto con traducción

- Con los perfiles aerodinámicos disponibles actualmente, se observa que el AEY de una turbina de dos palas no será mayor que el de una de tres palas. Este factor es importante, ya que parece ser la razón principal por la que el LPC de la turbina de dos palas no es mucho menor que el de la turbina de tres palas. Por lo tanto, una de las principales recomendaciones sería investigar nuevos perfiles aerodinámicos para la turbina de dos palas o diseñar perfiles aerodinámicos específicos para ella. No se sabe con certeza si esto le dará una ventaja al concepto de dos palas, ya que lo mismo puede hacerse con la turbina de tres palas. Sin embargo, según el análisis de fatiga de la turbina de tres palas con  $A_{design} = 9.8$ , un álabe esbelto requiere más material para cumplir con los requisitos estructurales. Esto podría otorgarle a la turbina de dos palas una ventaja en términos de menor consumo de material debido a su (prevista) mayor cuerda. [19]-

- Diámetro interno: 5 metros
- Potencia Generador: 50kw

#### **5.1.1. Modelar el BAT en AutoCAD con los datos revisados.**

Se realizó el modelado, usando la herramienta de AutoCAD, adecuando las características de construcción, **Figura 16**.

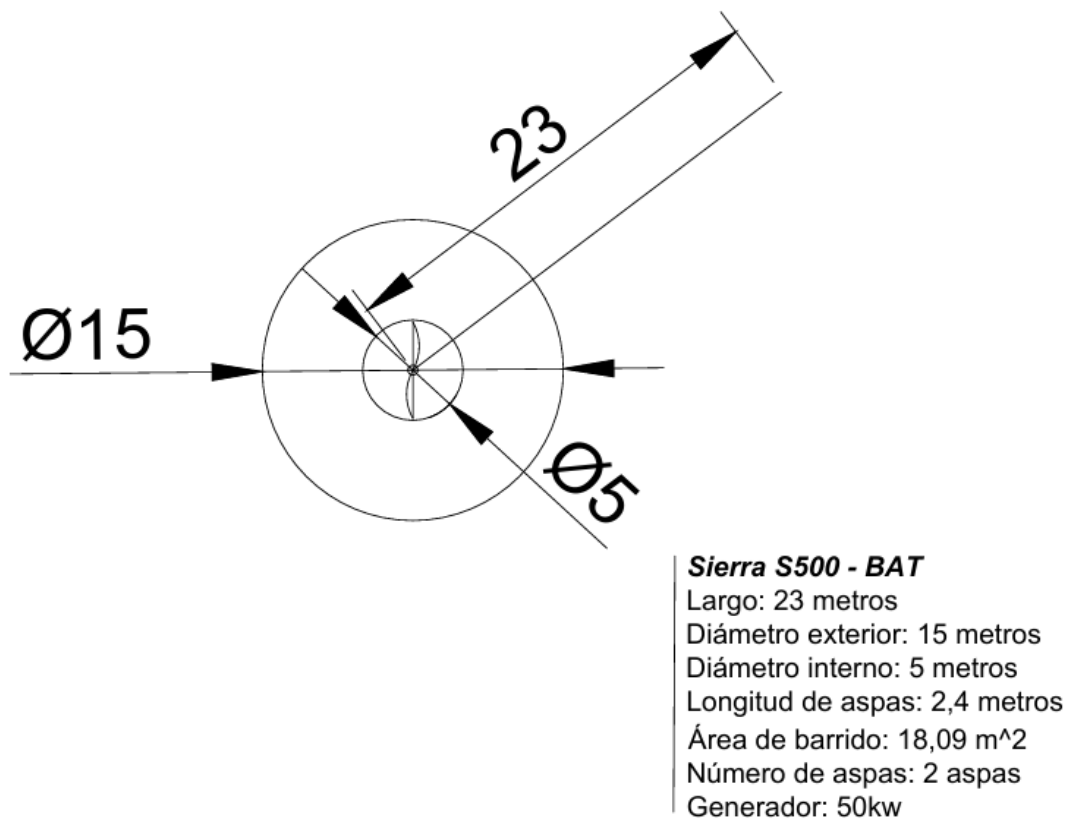


Figura 16. Modelado del Sierra S500 - AutoCAD

## 5.2. Investigar sobre el Aerogenerador convencional del Parque Villonaco

### 5.2.1. Revisar los datos de operación del Parque Eólico Villonaco

La Central Eólica Villonaco de 16.5 MW de potencia se encuentra ubicado en la provincia de Loja, cantón Loja. Es la primera Central Eólica en Ecuador Continental. La Central Eólica inició su construcción en agosto de 2011 y se encuentra operando de forma normal y continua sobre la base de los requerimientos del sistema eléctrico ecuatoriano desde el 2 de enero de 2013, aportando al S.N.I. una energía neta de 580,02 GWh desde su entrada en operación a octubre de 2020. Villonaco cuenta con 11 aerogeneradores del tipo GW70/1500 de 1.5 MW cada uno, **Figura 17**, donde se aprecia la extensión del parque eólico y la cantidad de aerogeneradores, con una velocidad promedio anual de 12.7 m/s a una altitud de 2700 msnm. La Central se desarrolla a lo largo de la línea de cumbre del cerro Villonaco con una distancia aproximada de 2 km. La subestación de elevación Villonaco 34.5 kV/69 kV tiene una capacidad de 25 MWA y presenta un esquema de conexión de barra principal y transferencia. La subestación Loja, contempla la instalación de una bahía de 69 kV, la cual recibe la energía proveniente de la subestación Villonaco para ser conectada al S.N.I. El parque eólico Villonaco es el primer proyecto del país en

este ámbito, constituye un reto técnico importante al ser la central eólica de mayor altitud a nivel mundial, se encuentra en zona montañosa con orografía compleja caracterizada por pendientes y rugosidad del terreno. La densidad del aire  $0,89 \frac{kg}{m^3}$ . [20]



Figura 17. Aerogeneradores del Parque Eólico Villonaco  
Se investigó la ficha técnica del Parque Eólico Villonaco, **Tabla 7**, en la misma se obtuvo datos de la potencia total y longitud de aspas.

Tabla 7. Ficha Técnica del Parque Eólico Villonaco [21]

<b>FICHA TÉCNICA</b>	
<b>Potencia Total</b>	16.5 MW
<b>Inicio de operación comercial</b>	2013
<b>Aerogeneradores</b>	11 x GW 70/1500 IEC IA / S
<b>Altura de buje</b>	65 m
<b>Velocidad de viento promedio</b>	12.4 m/s
<b>Producción de energía anual</b>	71.94 GWh/año
<b>Factor de planta</b>	51.19%

<b>Conexión a la red</b>	Subestación Loja (69 kV)
<b>Tipo de tecnología</b>	Direct Drive
<b>Longitud de aspas</b>	35 m
<b>Tipo de generador</b>	Imanes permanentes
<b>Control de potencia de salida</b>	Pitch control
<b>Certificación</b>	Clase S

### 5.2.2. Registrar los datos de operación y el entorno

- Altura de operación: 2700 msnm
- Velocidad del viento: 12,7 m/s
- Densidad del viento:  $0.89 \frac{kg}{m^3}$

El valor de la densidad se corroboró con la **Tabla 5**, para tener un enfoque más preciso, los puntos a revisar es de 2000 msnm (Punto 1) a 4000 msnm (Punto 2), **Tabla 8**, teniendo en cuenta que la altura a la que se encuentran los generadores tradicionales de Parque Eólico Villonaco es de 2700 msnm, siendo el punto medio, los 3000 msnm, dentro de esta escala no se encuentra una variación alta de la densidad, por lo cual, se tomará el valor de  $0.89 \frac{kg}{m^3}$ , como una constante para los cálculos en donde se usó la densidad del viento.

Tabla 8. Verificación del valor de densidad

Altitud msnm (m)	Temperatura (°K)	Presión (KPa)	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )
0	288,2	101,3	1,125
500	284,9	95,43	1,167
1000	281,7	89,85	1,112
<b>2000 – Punto 1</b>	<b>275,2</b>	<b>79,48</b>	<b>1,007</b>
<b>Valor promedio entre el Punto 1 y el Punto 2</b>			<b>0,89</b>

4000 – Punto 2	262,2	61,64	0,81194
----------------	-------	-------	---------

### 5.2.3. Revisar las características del aerogenerador convencional del Parque Eólico Villonaco.

Se revisó los datos de la Ficha Técnica de la **Tabla 6**, y se obtuvo las características de la medida de las aspas que usa el aerogenerador de Villonaco.

- Altura del buje: 65 metros
- Longitud de aspas: 35 metros
- Cantidad de aspas: 3 aspas
- Generador: 1.5 MW
- Área de barrido usando la fórmula:

$$A = \pi * r^2 \quad (3)$$

$$A = \pi * (35)^2$$

$$A = 3848,45 \text{ m}^2$$

- Valor del Cp: 0,41 [22]
- Límite de Betz: 0,59
- **Valor del Cp y compararlo con el límite de Betz**

En primera instancia se realizó la Tabla 9 con el valor del Cp y Límite de Betz, se puede obtener el rendimiento del Cp real a comparación del Límite de Betz con la Fórmula 6.

$$\text{Rendimiento} = \frac{Cp * 100}{\text{Límite de Betz}} \quad (6)$$

Tabla 9. Valores de Cp

Detalle	Valor
Límite de Betz	0,59
CP	0,41
<b>Rendimiento</b>	<b>69,14</b>

Con los resultados obtenidos se realizó una gráfica comparativa, **Figura 18**, el valor del Cp es menor al límite de Betz, por lo cual, esta correcto el valor para la realización de los cálculos.

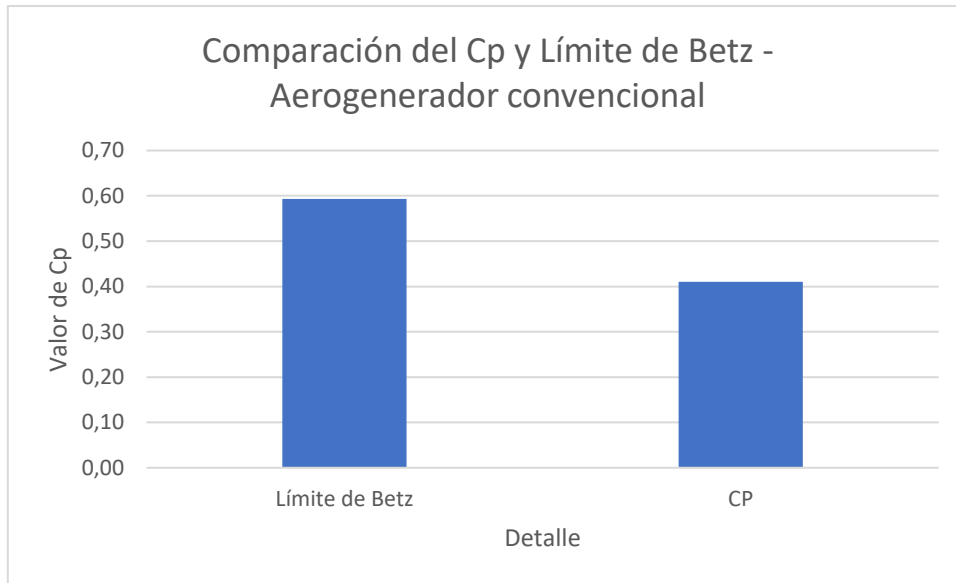


Figura 18. Comparación del Cp y límite de Betz - Aerogenerador convencional

#### 5.2.4. Modelar el aerogenerador convencional en AutoCAD

Con los datos investigados, se realizó el modelado del aerogenerador convencional, **Figura 19.**

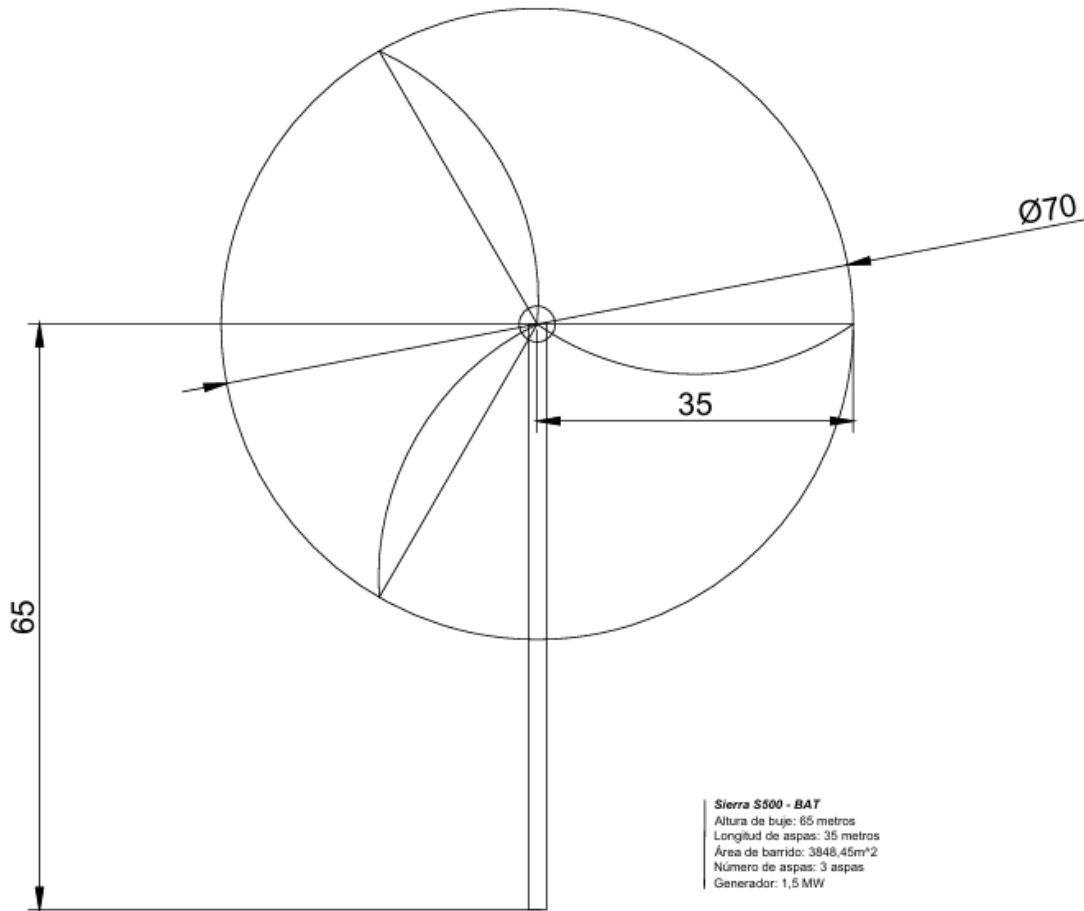


Figura 19. Modelado de Aerogenerador convencional

**5.2.5. Cálculo de la potencia de salida del Aerogenerador de Villonaco con el uso de la fórmula:**

$$P = \frac{1}{2} * \rho * A * Cp * v^3 \quad (2)$$

Se utilizó la **Ecuación 2**, para obtener los resultados de la potencia de salida del Aerogenerador, el resultado, se describe en la **Tabla 10**, a continuación, se obtuvo un valor de 1,5MW:

Tabla 10. Potencia de salida

Cálculo de potencia de salida	
Datos	
Constante	0,50
Densidad kg/m <sup>3</sup>	0,89

Longitud de aspas ( r)	35,00
Área de barrido m <sup>2</sup>	3848,46
Coefficiente de potencia (Cp)	0,41
Velocidad (m/s)	12,70
<b>Total (MW)</b>	<b>1,44</b>

**5.2.6. Cálculo del rendimiento del Aerogenerador convencional de Villonaco con el uso de la fórmula:**

$$\eta = (Potencia\ de\ salida / Potencia\ de\ entrada) * 100 \quad (4)$$

Para el cálculo del rendimiento se utilizó la **Fórmula 4**, y los datos de la capacidad del generador y potencia de salida de la **Tabla 8**.

Tabla 11. Cálculo de rendimiento del Aerogenerador

<b>Rendimiento</b>	
<b>Datos</b>	
Potencia de salida (MW)	1,44
Potencia de entrada (MW)	1,50
<b>Total (%)</b>	<b>96,00</b>

Se obtuvo el valor del rendimiento del Aerogenerador, **Tabla 11**, el rendimiento es sumamente alto con un valor de 96%.

**5.3. Extrapolar la variación de la velocidad del viento con respecto a la altura**

**5.3.1. Registrar los datos de operación del aerogenerador del Parque Eólico Villonaco**

Para extrapolar la velocidad respecto a la altura es necesario usar el valor base, es decir una altura y velocidad determinadas, por lo que, se usó los datos de Villonaco:

- **Velocidad del viento:** 12,7 m/s
- **Altura:** la altura que se utilizó para el cálculo fue la del buje del generador convencional de 65 metros del Parque Eólico Villonaco, teniendo en cuenta que

nuestro valor de referencia sería 2700msnm (elevación del Parque Eólico Villonaco), es decir sería nuestro punto cero, **Tabla 12**, para una fácil comprensión.

Tabla 12. Alturas de estudio

Altura msnm	Altura m
2700	0
2765	65 (Altura del Buje)
2800	100
2900	200
3000	300
3100	400
3200	500

Con el valor de la altura respecto al nivel del suelo y la velocidad, se realizó las extrapolaciones con la ecuación:

$$V2 = V1 * \left(\frac{h2}{h1}\right)^\alpha \quad (1)$$

Dentro de la ecuación se tomó el valor de la rugosidad de Villonaco y se comparó con el de la **Tabla 4**, siendo un valor de 0,2, **Tabla 13** y corroborado la investigación en Villonaco:

- **Rugosidad:** Villonaco se tiene una rugosidad de terreno de 0,2 [10].

El valor de rugosidad obtenido, se usó como base para todos los cálculos.

Tabla 13. Rugosidad de Villonaco

2,5	0,2	31	Campo con algunas casas y arbolado de hasta 8 m, situado como mínimo a 25 m
-----	-----	----	---

**5.3.2. Calcular la velocidad del viento a 100m, 200m, 300m, 400m y 500m de altura con la fórmula:**

$$V_2 = V_1 * \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^\alpha \quad (1)$$

- Velocidad del viento a 100 metros de altura

A una altura de 100 metros, se tiene un valor de velocidad de 13,84m/s, **Tabla 14.**

Tabla 14. Velocidad a 100 metros de altura

<b>Extrapolación de la velocidad del viento</b>	
<b>Datos</b>	
Altura conocida (m)	65,00
Velocidad del viento conocida (m/s)	12,70
Altura de la velocidad a calcular (m)	100,00
Longitud de rugosidad (m)	0,20
<b>Total (m/s)</b>	<b>13,84</b>

- Velocidad del viento a 200 metros de altura

A una altura de 200 metros, se tiene un valor de velocidad de 15,90m/s, **Tabla 15.**

Tabla 15. Velocidad a 200 metros de altura

<b>Extrapolación de la velocidad del viento</b>	
<b>Datos</b>	
Altura conocida (m)	65,00
Velocidad del viento conocida (m/s)	12,70
Altura de la velocidad a calcular (m)	200,00
Longitud de rugosidad (m)	0,20
<b>Total (m/s)</b>	<b>15,90</b>

- Velocidad del viento a 300 metros de altura

A una altura de 300 metros, se tiene un valor de velocidad de 17,24m/s, **Tabla 16.**

Tabla 16. Velocidad a 300 metros de altura

<b>Extrapolación de la velocidad del viento</b>	
<b>Datos</b>	
Altura conocida (m)	65,00
Velocidad del viento conocida (m/s)	12,70
Altura de la velocidad a calcular (m)	300,00
Longitud de rugosidad (m)	0,20
<b>Total (m/s)</b>	<b>17,24</b>

- Velocidad del viento a 400 metros de altura

A una altura de 400 metros, se tiene un valor de velocidad de 18,27m/s, **Tabla 17.**

Tabla 17. Velocidad a 400 metros de altura

<b>Extrapolación de la velocidad del viento</b>	
<b>Datos</b>	
Altura conocida (m)	65,00
Velocidad del viento conocida (m/s)	12,70
Altura de la velocidad a calcular (m)	400,00
Longitud de rugosidad (m)	0,20
<b>Total (m/s)</b>	<b>18,27</b>

- Velocidad del viento a 500 metros de altura

A una altura de 500 metros, se tiene un valor de velocidad de 19,09m/s, **Tabla 18.**

Tabla 18. Velocidad a 500 metros de altura

<b>Extrapolación de la velocidad del viento</b>	
<b>Datos</b>	
Altura conocida (m)	65,00
Velocidad del viento conocida (m/s)	12,70
Altura de la velocidad a calcular (m)	500,00
Longitud de rugosidad (m)	0,20
<b>Total (m/s)</b>	<b>19,09</b>

### 5.3.3. Registrar los resultados de la extrapolación

En base a los resultados obtenidos por la extrapolación, se cumple, con la proporcionalidad, en la que se aumenta la altura y la velocidad del viento aumenta, **Tabla 19.** y de manera gráfica en la **Ilustración 20.**

Tabla 19. Extrapolación del viento

<b>ALTURA (m)</b>	<b>VELOCIDAD DEL VIENTO (m/s)</b>
65	12,70
100	13,84
200	15,90
300	17,24
400	18,27
500	19,09



Figura 20. Extrapolación del viento

#### 5.4. Calcular la potencia de salida del BAT

##### 5.4.1. Usar los datos de la Tabla 19:

- **Velocidad del viento:**
  - 65 metros de altura: 12,7m/s
  - 100 metros de altura: 13,84m/s
  - 200 metros de altura: 15,90m/s
  - 300 metros de altura: 17,24m/s
  - 400 metros de altura: 18,27m/s
  - 500 metros de altura: 19,09m/s
- **Densidad de viento:**  $0,89 \frac{kg}{m^3}$
- **Longitud de aspas:** 2,4m
- **Área de barrido:**  $19,09 m^2$
- **Valor de Cp:** 0,25,
- **Límite de Betz:** 59,3
- **Valor del Cp y compararlo con el límite de Betz**

En primera instancia se realizó la **Tabla 20**, con el valor del Cp y Límite de Betz, se puede obtener el rendimiento del Cp real a comparación del Límite de Betz con la **Fórmula 6**.

$$Rendimiento = \frac{Cp \cdot 100}{Límite de Betz} \quad (6)$$

Tabla 20. Comparación Cp y límite de Betz.

Detalle	Valor
Límite de Betz	0,59
CP	0,25
Rendimiento	42,16

Con los resultados obtenidos se realizó una gráfica comparativa, **Figura 21**, el valor del Cp es menor al límite de Betz, por lo cual, esta correcto el valor para la realización de los cálculos.

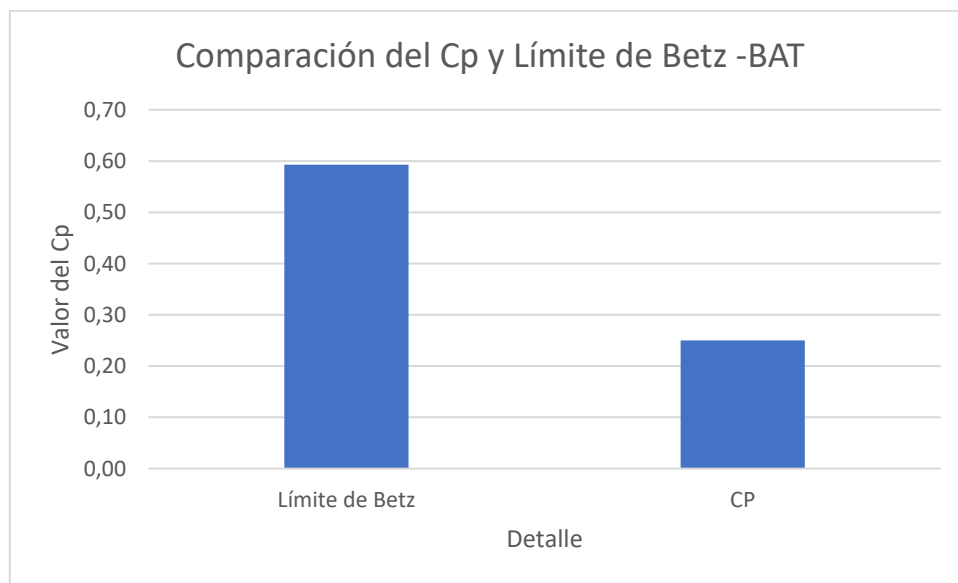


Figura 21. Comparación del Cp y Límite de Betz - BAT

#### 5.4.2. Cálculos de potencia a 65m, 100m, 200m, 300m, 400m, 500m

- **Cálculo de potencia a 65 metros de altura**

A una altura de 65 metros, se tiene una potencia de salida de 4,12kw, Tabla 21.

Tabla 21. Cálculo de potencia a 65m de altura

Cálculo de potencia de salida
Datos

Constante	0,50
Densidad kg/m <sup>3</sup>	0,89
Longitud de aspas (metros)	2,40
Área de barrido m <sup>2</sup>	18,09
Coefficiente de potencia (Cp)	0,25
Velocidad (m/s)	12,7
<b>Total (kw)</b>	<b>4,12</b>

- **Cálculo de potencia a 100 metros de altura**

A una altura de 100 metros, se tiene una potencia de salida de 4,33kw, **Tabla 22.**

Tabla 22. Cálculo de potencia a 100m de altura

<b>Cálculo de potencia de salida</b>	
<b>Datos</b>	
Constante	0,50
Densidad kg/m <sup>3</sup>	0,89
Longitud de aspas (metros)	2,40
Área de barrido m <sup>2</sup>	18,09
Coefficiente de potencia (Cp)	0,25
Velocidad (m/s)	13,84
<b>Total (kw)</b>	<b>5,33</b>

- **Cálculo de potencia a 200 metros de altura**

A una altura de 200 metros, se tiene una potencia de salida de 8,09kw, **Tabla 23.**

Tabla 23. Cálculo de potencia a 200m de altura

<b>Cálculo de potencia de salida</b>	
<b>Datos</b>	

Constante	0,50
Densidad kg/m <sup>3</sup>	0,89
Longitud de aspas (metros)	2,40
Área de barrido m <sup>2</sup>	18,09
Coefficiente de potencia (Cp)	0,25
Velocidad (m/s)	15,90
<b>Total (kw)</b>	<b>8,09</b>

- **Cálculo de potencia a 300 metros de altura**

A una altura de 300 metros, se tiene una potencia de salida de 10,32kw, **Tabla 24.**

Tabla 24. Cálculo de potencia a 300m de altura

<b>Cálculo de potencia de salida</b>	
<b>Datos</b>	
Constante	0,50
Densidad kg/m <sup>3</sup>	0,89
Longitud de aspas (metros)	2,40
Área de barrido m <sup>2</sup>	18,09
Coefficiente de potencia (Cp)	0,25
Velocidad (m/s)	17,24
<b>Total (kw)</b>	<b>10,32</b>

- **Cálculo de potencia a 400 metros de altura**

A una altura de 400 metros, se tiene una potencia de salida de 12,26kw, **Tabla 25.**

Tabla 25. Cálculo de potencia a 400m de altura

<b>Cálculo de potencia de salida</b>	
--------------------------------------	--

<b>Datos</b>	
Constante	0,50
Densidad kg/m <sup>3</sup>	0,89
Longitud de aspas (metros)	2,40
Área de barrido m <sup>2</sup>	18,09
Coefficiente de potencia (Cp)	0,25
Velocidad (m/s)	18,26
<b>Total (kw)</b>	<b>12,26</b>

- **Cálculo de potencia a 500 metros de altura**

A una altura de 500 metros, se tiene una potencia de salida de 14,02kw, **Tabla 26.**

Tabla 26. Cálculo de potencia a 400m de altura

<b>Cálculo de potencia de salida</b>	
<b>Datos</b>	
Constante	0,50
Densidad kg/m <sup>3</sup>	0,89
Longitud de aspas (metros)	2,40
Área de barrido m <sup>2</sup>	18,09
Coefficiente de potencia (Cp)	0,25
Velocidad (m/s)	19,09
<b>Total (kw)</b>	<b>14,02</b>

En base a los resultados, se desarrolló la **Figura 22**, en base a los resultados extraídos en la **Tabla 27.**

Tabla 27. Resultados de potencia de salida

<b>Resultados de potencia de salida</b>	
<b>Altura (m)</b>	<b>Potencia (kw)</b>

65	4,12
100	5,33
200	8,09
300	10,32
400	12,26
500	14,02

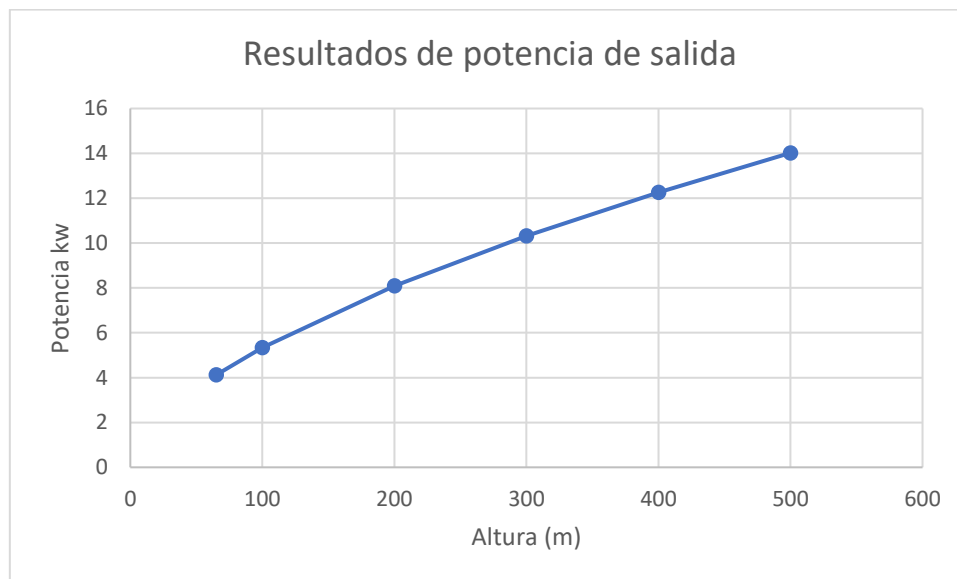


Figura 22. Resultados de potencia de salida

## 5.5. Cálculo del rendimiento del Aerogenerador BAT

### 5.5.1. Cálculo del rendimiento del BAT

$$\eta = (\text{Potencia de salida} / \text{Potencia de entrada}) * 100\% \quad (4)$$

En base a la premisa de investigación desarrollada, se usó un generador de 50kw, para el cálculo del rendimiento, respecto a las potencias generadas en cada altura, siendo en el caso:

- **Rendimiento a 65 metros de altura**

A una altura de 65 metros, se tiene un valor de rendimiento de 8,25%, **Tabla 28.**

Tabla 28. Rendimiento a 65 metros de altura

<b>Rendimiento</b>	
<b>Datos</b>	
Potencia de salida (kw)	4,12
Potencia de entrada (kw)	50,00
<b>Total (%)</b>	<b>8,25</b>

- **Rendimiento a 100 metros de altura**

A una altura de 100 metros, se tiene un valor de rendimiento de 10,68%, **Tabla 29.**

Tabla 29. Rendimiento a 100 metros de altura

<b>Rendimiento</b>	
<b>Datos</b>	
Potencia de salida (kw)	5,34
Potencia de entrada (kw)	50,00
<b>Total (%)</b>	<b>10,68</b>

- **Rendimiento a 200 metros de altura**

A una altura de 200 metros, se tiene un valor de rendimiento de 16,19%, **Tabla 30.**

Tabla 30. Rendimiento a 200 metros de altura

<b>Rendimiento</b>	
<b>Datos</b>	
Potencia de salida (kw)	8,09
Potencia de entrada (kw)	50,00
<b>Total (%)</b>	<b>16,19</b>

- **Rendimiento a 300 metros de altura**

A una altura de 300 metros, se tiene un valor de rendimiento de 20,64%, **Tabla 31.**

Tabla 31. Rendimiento a 300 metros de altura

<b>Rendimiento</b>	
<b>Datos</b>	
Potencia de salida (kw)	10,32
Potencia de entrada (kw)	50,00
<b>Total (%)</b>	<b>20,64</b>

- **Rendimiento a 400 metros de altura**

A una altura de 400 metros, se tiene un valor de rendimiento de 24,45%, **Tabla 32.**

Tabla 32. Potencia a 400 metros de altura

<b>Rendimiento</b>	
<b>Datos</b>	
Potencia de salida (kw)	12,27
Potencia de entrada (kw)	50,00
<b>Total (%)</b>	<b>24,45</b>

- **Rendimiento a 500 metros de altura**

A una altura de 500 metros, se tiene un valor de rendimiento de 28,05%, **Tabla 33.**

Tabla 33. Potencia a 500 metros de altura

<b>Rendimiento</b>	
<b>Datos</b>	
Potencia de salida (kw)	14,03
Potencia de entrada (kw)	50,00
<b>Total (%)</b>	<b>28,05</b>

## **5.6. Análisis de rendimiento del Aerogenerador convencional del Parque Eólico Villonaco contra el BAT**

### **5.6.1. Comparación de alturas de operación**

La altura de operación entre los sistemas es bastante notable, **Figura 23**, siendo que el aerogenerador convencional, no podrá tener más altitud de la que ya tiene siendo de 65 metros por la altura del buje, se podría hacer que el aerogenerador convencional tenga mas altura, pero significaría mayores costos, material y tiempo, para que su base pueda soportar el peso de las aspas, la velocidad del viento y tiempo de construcción, mientras que el BAT puede alcanzar alturas de 65 metros a 500 metros sin problema, siendo el caso del prototipo Sierra S500.

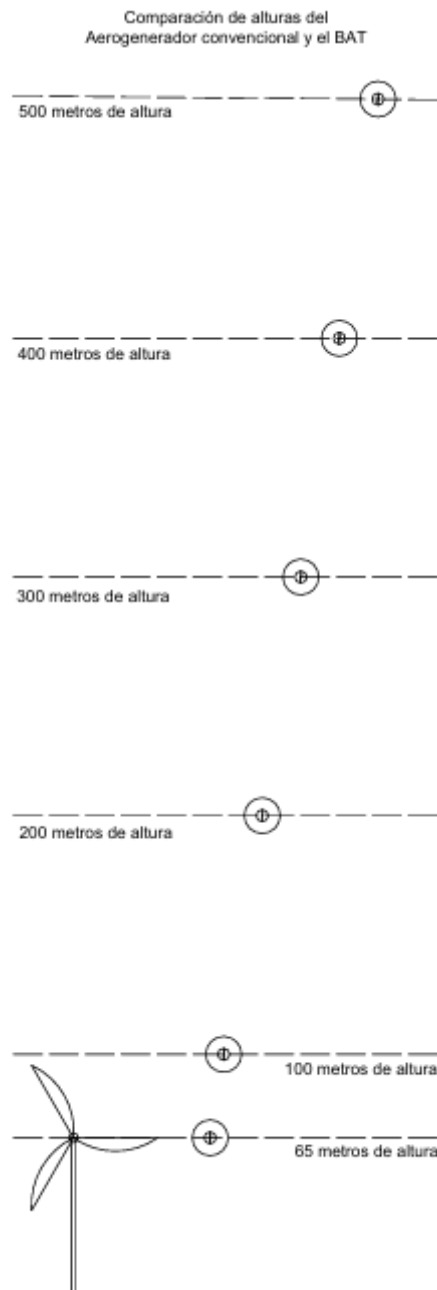


Figura 23. Comparación de alturas

### 5.6.2. Comparación de rendimiento

Para la comparación del rendimiento, se extrajeron los resultados calculados, **Tabla 34**, para adecuarlos a una gráfica comparativa, **Figura 24**, la comparativa nos permitió verificar de manera sencilla lo que se postulaba en la comparación de alturas de operación de los dos sistemas, siendo el BAT, una de los sistemas capaz de lograr llegar a grandes alturas.

Tabla 34. Comparación de rendimiento

Altura (m)	Comparación del rendimiento	
	Aerogenerador convencional (%)	BAT (%)
65	96	8,25
100	N/A	10,68
200	N/A	16,19
300	N/A	20,64
400	N/A	24,45
500	N/A	28,05

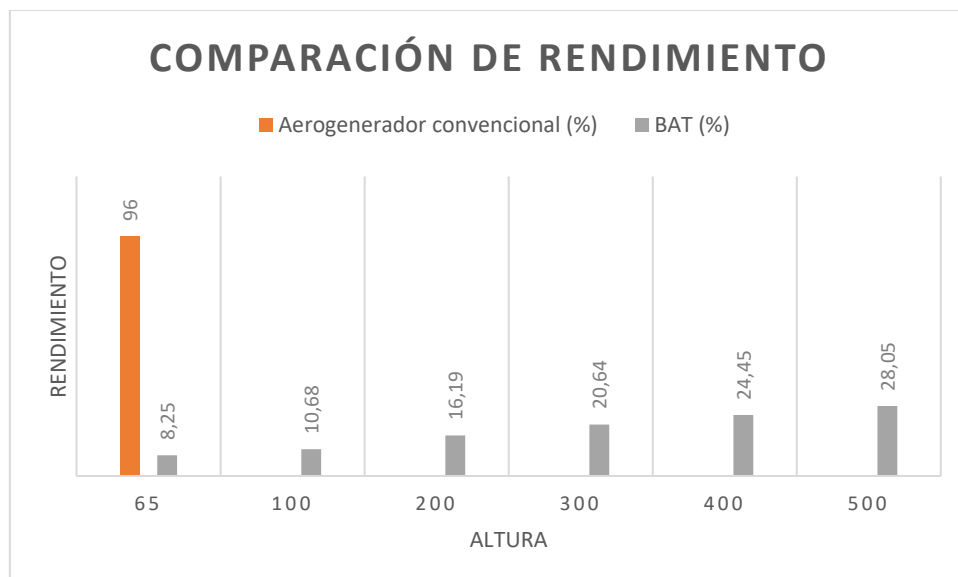


Figura 24. Comparación de rendimiento

En la **Figura 24**, se identificó un problema en el BAT y es su rendimiento, se apreció que el BAT tiene mucho menor rendimiento a comparación del aerogenerador convencional, sin embargo, también hay algo importante que señalar, y es que, el BAT aumenta su

rendimiento de manera lineal conforme llega a más altura, es decir que se puede lograr mayor rendimiento realizando una modificación al BAT, si bien es cierto, no se puede modificar el valor de  $C_p$ , o la velocidad del viento, se puede hacer cambios en el área de barrido de las aspas, si se aumenta el valor de la longitud de las aspas, aumenta la potencia de salida, esto llevo a que se realizará el cálculo para las aspas que podrían aumentar el rendimiento del BAT.

## 5.7. Cálculo de aspas necesarias para la óptima operación

### 5.7.1. Se utiliza la ecuación de potencia para despejar el radio y obtener el resultado esperado:

$$P = \frac{1}{2} * (\pi * r^2) * C_p * v^3 \quad (2)$$

$$r = \sqrt{\frac{P}{0,5 * \pi * C_p * v^3}} \quad (5)$$

En este caso se usó la fórmula despejada de la potencia de salida, para determinar el área de barrido, para generar 50kw, teniendo en cuenta que nuestra optima operación empezaría a 65 metros de altura, se usó el valor de densidad de  $0,89 \frac{kg}{m^3}$ , 12,7 m/s, la velocidad del viento, y el valor de  $C_p$  sigue siendo el mismo valor de 0,25.

Ahora si bien es cierto, se podría calcular con los datos máximos a 500 metros de altura, sería innecesario hacerlo, ya que el rendimiento subiría conforme con la altura y se llegaría a un rendimiento del 100% teórico, sin conocer la verdadera ventaja del BAT, de aumentar la potencia generada conforme asciende a más altura.

Se reemplazó en la **Fórmula 5**, de la siguiente manera y tomando en cuenta el reemplazo realizado sobre  $A$ = área de barrido por la ecuación  $A = \pi * r^2$  lo que permitió obtener el resultado de la longitud de las aspas de manera más sencilla.

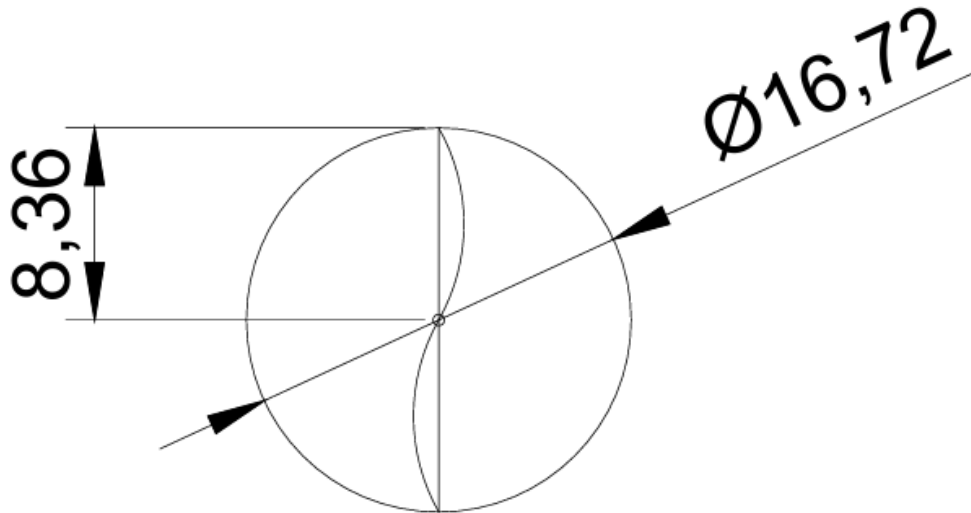
$$r = \sqrt{\frac{50000}{0,5 * \pi * 0,25 * 12,7^3 * 0,89}} \quad (5)$$

$$r = 8,36$$

Se obtuvo un resultado de: 8,357 m de longitud de aspas, cabe señalar que este valor es netamente teórico, en el caso de una persona externa, requiera realizar el modelado del BAT completo son su estructura toroidal.

### 5.7.2. Modelar las aspas teóricas calculadas del BAT

Se realizó el modelado de las aspas con la nueva longitud, en la **Figura 25**, sin embargo, no se inducirá en la fabricación del toroide, solo en los cálculos para obtener el rendimiento con las aspas calculadas.



Aspas calculadas: 8,36 metros

Figura 25. Modelado de aspas calculadas

### 5.8. Cálculo de la potencia del BAT – aspas calculadas

Se realizó el cálculo respectivo con la nueva longitud de aspas, para que la velocidad del viento sea aprovechada desde los 65 metros de altura, que es la altura del buje de Villonaco.

- **Cálculo de potencia a 65 metros de altura – aspas calculadas**

A una altura de 65 metros, se tiene un valor de potencia de salida de 50,04kw, **Tabla 35**.

Tabla 35. Potencia a 65 metros de altura - aspas calculadas

Cálculo de potencia de salida	
Datos	
Constante	0,50

Densidad kg/m <sup>3</sup>	0,89
Longitud de aspas ( r )	8,36
Área de barrido m <sup>2</sup>	219,57
Coefficiente de potencia (Cp)	0,25
Velocidad (m/s)	12,70
<b>Total (kw)</b>	<b>50,04</b>

- **Cálculo de potencia a 100 metros de altura – aspas calculadas**

A una altura de 100 metros, se tiene un valor de potencia de salida de 64,75kw, **Tabla 36.**

Tabla 36. Potencia a 100 metros de altura - aspas calculadas

<b>Cálculo de potencia de salida</b>	
<b>Datos</b>	
Constante	0,5
Densidad kg/m <sup>3</sup>	0,89
Longitud de aspas ( r )	8,36
Área de barrido m <sup>2</sup>	219,56517
Coefficiente de potencia (Cp)	0,25
Velocidad (m/s)	13,84
<b>Total (kw)</b>	<b>64,75</b>

- **Cálculo de potencia a 200 metros de altura – aspas calculadas**

A una altura de 200 metros, se tiene un valor de potencia de salida de 98,19kw, **Tabla 37.**

Tabla 37. Potencia a 200 metros de altura - aspas calculadas

<b>Cálculo de potencia de salida</b>	
<b>Datos</b>	

Constante	0,50
Densidad kg/m <sup>3</sup>	0,89
Longitud de aspas ( r )	8,36
Área de barrido m <sup>2</sup>	219,56
Coefficiente de potencia (Cp)	0,25
Velocidad (m/s)	15,90
<b>Total (kw)</b>	<b>98,18</b>

- **Cálculo de potencia a 300 metros de altura – aspas calculadas**

A una altura de 300 metros, se tiene un valor de potencia de salida de 125,16kw, **Tabla 38.**

Tabla 38. Potencia a 300 metros de altura - aspas calculadas

<b>Cálculo de potencia de salida</b>	
<b>Datos</b>	
Constante	0,50
Densidad kg/m <sup>3</sup>	0,89
Longitud de aspas ( r )	8,36
Área de barrido m <sup>2</sup>	219,57
Coefficiente de potencia (Cp)	0,25
Velocidad (m/s)	17,24
<b>Total (kw)</b>	<b>125,16</b>

- **Cálculo de potencia a 400 metros de altura – aspas calculadas**

A una altura de 400 metros, se tiene un valor de potencia de salida de 148,96kw, **Tabla 39.**

Tabla 39. Potencia a 400 metros de altura - aspas calculadas

<b>Cálculo de potencia de salida</b>	
<b>Datos</b>	

Constante	0,50
Densidad kg/m <sup>3</sup>	0,89
Longitud de aspas ( r )	8,36
Área de barrido m <sup>2</sup>	219,57
Coefficiente de potencia (Cp)	0,25
Velocidad (m/s)	18,27
<b>Total (kw)</b>	<b>148,96</b>

- **Cálculo de potencia a 500 metros de altura – aspas calculadas**

A una altura de 500 metros, se tiene un valor de potencia de salida de 169,93kw, **Tabla 40.**

Tabla 40. Potencia a 500 metros de altura - aspas calculadas

<b>Cálculo de potencia de salida</b>	
<b>Datos</b>	
Constante	0,50
Densidad kg/m <sup>3</sup>	0,89
Longitud de aspas ( r )	8,36
Área de barrido m <sup>2</sup>	219,57
Coefficiente de potencia (Cp)	0,25
Velocidad (m/s)	19,09
<b>Total (kw)</b>	<b>169,93</b>

En base a los resultados, se desarrolló la **Figura 26**, en base a los resultados extraídos en la **Tabla 41.**

Tabla 41. Resultados de potencia de salida - aspas calculadas

<b>Resultados de potencia de salida – aspas calculadas</b>	
<b>Altura (m)</b>	<b>Potencia (kw)</b>

65	50,04
100	64,75
200	98,18
300	125,16
400	148,96
500	169,93

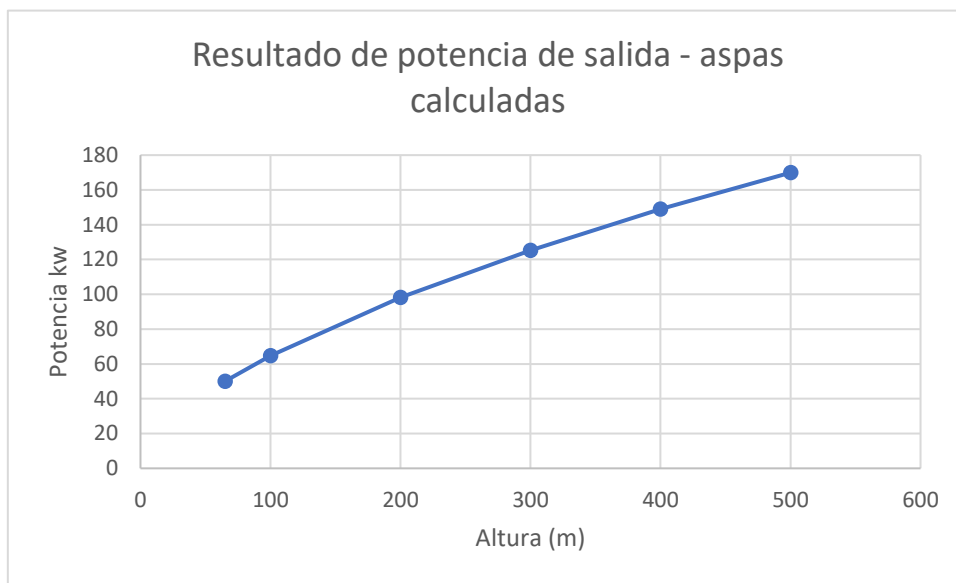


Figura 26. Resultado de potencia de salida - aspas calculadas

Al revisar la **Figura 26**, se verificó que, en efecto, la potencia de salida del BAT, era por mucho, mayor a la potencia de entrada del generador, siendo el mismo de 50kw, por lo cual se determina que a medida que el BAT aumenta la altura, es necesario también usar un generador con mayor capacidad, mejorando de esta manera la producción energética a mayor altura.

## 5.9. Cálculo del rendimiento del BAT

### 5.9.1. Cálculo del rendimiento del BAT – aspas calculadas

Para el cálculo del rendimiento del BAT se usó las nuevas potencias calculadas con las nuevas aspas.

Con la fórmula  $\eta = (Potencia\ de\ salida / Potencia\ de\ entrada) * 100\%$  (4)

Sin embargo, no se puede realizar el cálculo del rendimiento con el mismo generador, en este caso se tuvo que investigar los generadores síncronos de imanes permanentes disponibles para los cálculos.

Para esto se realizó el cálculo con generadores de:

- TBVF SERIES: 55kw – 75kw
- TBVF SERIES: 90kw – 160kw (90kw, 110kw, 132kw, 160kw)
- TBVF SERIES: 200kw – 250kw [23]
- **Rendimiento a 65 metros de altura**

A una altura de 65 metros, se tiene un valor de rendimiento de 90,98%, **Tabla 42**

Tabla 42. Rendimiento a 65 metros de altura - aspas calculadas

<b>Rendimiento</b>	
<b>Datos</b>	
Potencia de salida (kw)	50,04
Potencia de entrada (kw)	55,00
<b>Total (%)</b>	<b>90,98</b>

- **Rendimiento a 100 metros de altura**

A una altura de 100 metros, se tiene un valor de rendimiento de 86,33%, **Tabla 43.**

Tabla 43. Rendimiento a 100 metros de altura - aspas calculadas

<b>Rendimiento</b>	
<b>Datos</b>	
Potencia de salida (kw)	64,75
Potencia de entrada (kw)	75,00
<b>Total (%)</b>	<b>86,33</b>

- **Rendimiento a 200 metros de altura**

A una altura de 200 metros, se tiene un valor de rendimiento de 89,25%, **Tabla 44.**

Tabla 44. Rendimiento a 200 metros de altura - aspas calculadas

<b>Rendimiento</b>	
<b>Datos</b>	
Potencia de salida (kw)	98,18
Potencia de entrada (kw)	110,00
<b>Total (%)</b>	<b>89,25</b>

- **Rendimiento a 300 metros de altura**

A una altura de 300 metros, se tiene un valor de rendimiento de 94,82%, **Tabla 45.**

Tabla 45. Rendimiento a 300 metros de altura - aspas calculadas

<b>Rendimiento</b>	
<b>Datos</b>	
Potencia de salida (kw)	125,16
Potencia de entrada (kw)	132,00
<b>Total (%)</b>	<b>94,82</b>

- **Rendimiento a 400 metros de altura**

A una altura de 400 metros, se tiene un valor de rendimiento de 93,10%, **Tabla 46**

Tabla 46. Rendimiento a 400 metros de altura - aspas calculadas

<b>Rendimiento</b>	
<b>Datos</b>	
Potencia de salida (kw)	148,96
Potencia de entrada (kw)	160,00
<b>Total (%)</b>	<b>93,10</b>

- **Rendimiento a 500 metros de altura**

A una altura de 500 metros, se tiene un valor de rendimiento de 84,97%, **Tabla 47.**

Tabla 47. Rendimiento a 500 metros de altura - aspas calculadas

<b>Rendimiento</b>	
<b>Datos</b>	
Potencia de salida (kw)	169,93
Potencia de entrada (kw)	200,00
<b>Total (%)</b>	<b>84,97</b>

Se realizó la **Tabla 48**, en la cual, se presenta el generador utilizado para cada cálculo del rendimiento.

Tabla 48. Generador usado para los cálculos del rendimiento

<b>ALTURA (m)</b>	<b>POTENCIA DE SALIDA (kw)</b>	<b>POTENCIA DEL GENERADOR (kw)</b>	<b>RENDIMIENTO (%)</b>
65	50,04	55,00	90,98
100	64,75	75,00	86,33
200	110,00	98,18	112,04
300	125,16	132,00	94,82
400	148,96	160,00	93,10
500	169,93	200,00	84,97

## **5.10. Comparación de Rendimiento del aerogenerador convencional, el BAT, y el BAT con aspas calculadas**

### **5.10.1. Comparación de alturas de operación**

Dada la Figura 27, no se tuvo variación en el tema de las alturas de operación debido al cálculo realizado específicamente a esas alturas

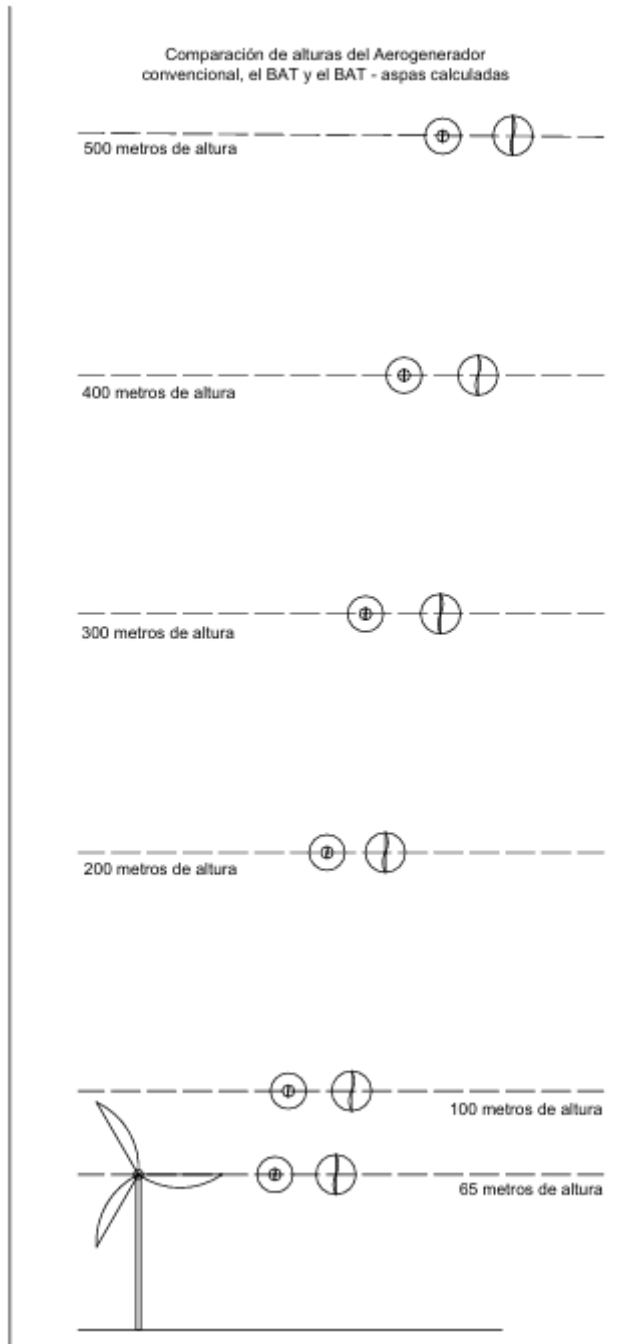


Figura 27. Comparación de alturas

### 5.10.2. Comparación de rendimiento

Para la comparación se extrajo los resultados del rendimiento de los cálculos realizados, **Tabla 49**, además se realizó la de manera grafica para comprender fácilmente el comportamiento del BAT ante el aerogenerador convencional, **Figura 28**.

Tabla 49. Comparación de rendimiento

Altura	Comparación del rendimiento		
	Aerogenerador convencional (%)	BAT (%)	BAT - aspas calculadas (%)
65	96	8,25	90,98
100	N/A	10,68	86,33
200	N/A	16,19	89,25
300	N/A	20,64	94,82
400	N/A	24,45	93,10
500	N/A	28,05	84,97

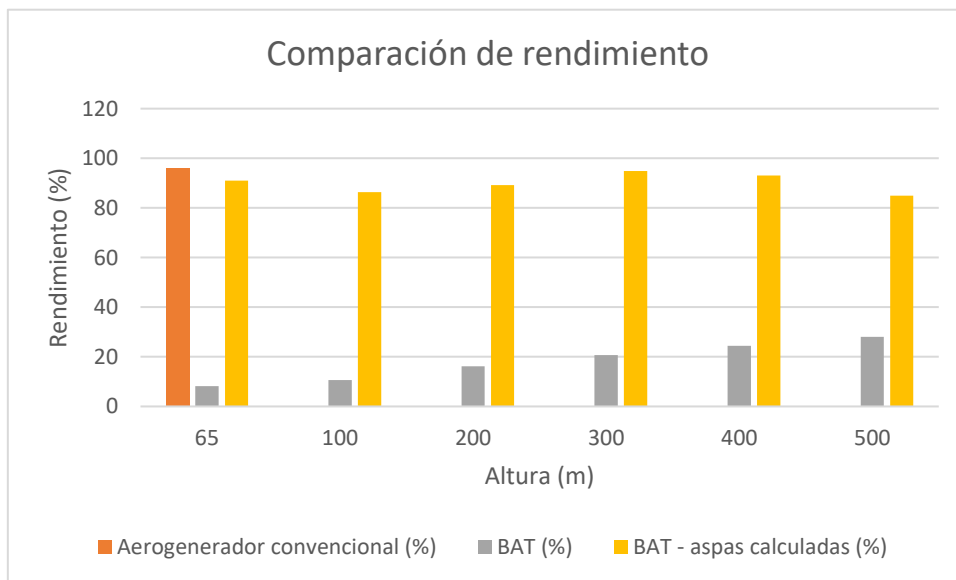


Figura 28. Comparación de rendimiento

### 5.10.3. Análisis de comparación

Después de haber realizado los cálculos pertinentes de los 3 sistemas a diferentes alturas, el BAT sin lugar a duda resulta ser una gran opción por sobre el aerogenerador convencional, por el simple hecho que si bien es cierto, no se obtuvo un rendimiento del 100%, esto es debido a que en la práctica se puede hacer un ajuste del BAT entre los segmentos de altura para lograr un rendimiento del 100% a comparación del aerogenerador convencional, el cual, no podría aumentar su rendimiento, si este ya está con su altura determinada.

El BAT permite jugar con la altura conveniente para obtener vientos con más velocidad y siendo los mismos, también constantes.

El BAT a mayor altura, requiere el cambio del generador para aumentar su producción energética por lo cual hace que el sistema sea mejor a comparación del generador convencional, el cual presenta pérdidas si es que no se cuenta con el generador apropiado y que se encuentre a una altura determinada para aprovechar de mejor manera la energía eólica.

## **6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **6.1. Conclusiones**

- El BAT es un sistema, el cual usa la relación altura – velocidad del viento, para su funcionamiento, al igual que un generador convencional, sin embargo, tiene la facilidad de ascender o descender, conforme se requiera, para mejorar el rendimiento respecto al generador que use.
- El BAT representa un rendimiento siendo el mas bajo de 84,97% y el mas alto de 94,82%, no obstante, se puede lograr mayor rendimiento variando la altura a la que se estime, según las características del entorno.
- El BAT presenta un rendimiento bastante alto en relación al generador y la potencia de salida según las características del entorno, sin embargo, la comparativa con la potencia generada del BAT con el generador convencional del Parque Eólico Villonaco, no tiene forma de determinarse, y esto se debe a la longitud de las aspas que debería tener el BAT para realizar los cálculos.
- El BAT, podría ser utilizado para lugares en los cuales, sea complicado el uso de los aerogeneradores convencionales o se requiera poca producción de energía eléctrica, lo que hace que el sistema no sea optimo a gran escala.
- El BAT, podría ser considerado un sistema de apoyo, por su baja producción de energía debido a los factores del entorno en el que se encuentra y el valor de  $C_p$ : 0,25 que tiene actualmente.

### **6.2. Recomendaciones**

- El BAT aún se encuentra en fase de prototipo, es decir, los datos calculados pueden variar en el plano físico, por lo cual, es importante desarrollar nuestra propia investigación acerca de la forma de construcción del BAT con respecto al entorno.
- Desarrollar simulación para comprender el comportamiento del BAT en diferentes entornos, en el caso de requerir una implementación.

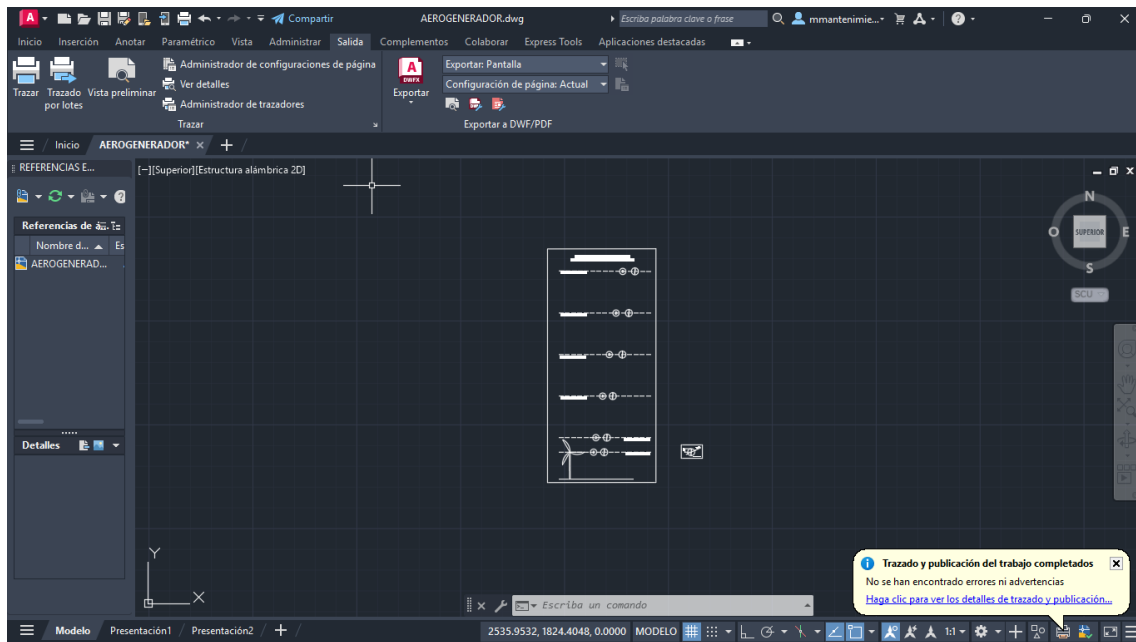
## 7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Constanza Vacas, «6 frases de Nikola Tesla que muestran cómo la ciencia impregnó cada rincón de su vida», 2024. [En línea]. Disponible en: [https://historia.nationalgeographic.com.es/a/frases-nikola-tesla-que-muestran-como-tecnologia-impregno-cada-rincon-su-vida\\_21796](https://historia.nationalgeographic.com.es/a/frases-nikola-tesla-que-muestran-como-tecnologia-impregno-cada-rincon-su-vida_21796)
- [2] MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS, «ECUADOR CONSOLIDA LA PRODUCCIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE FUENTES RENOVABLES», MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS. [En línea]. Disponible en: <https://www.recursoyenergia.gob.ec/ecuador-consolida-la-produccion-electrica-a-partir-de-fuentes-renovables/>
- [3] Jean Rosales, «Análisis Weibull en la ingeniería de confiabilidad», Fractal. [En línea]. Disponible en: <https://www.fractal.com/es/mantenipedia/pasos-para-realizar-el-analisis-weibull>
- [4] U.S. National Science Foundation, «Floating wind turbines bring electricity where it's needed», *US Natl. Sci. Found.*, 2015, [En línea]. Disponible en: <https://www.nsf.gov/news/floating-wind-turbines-bring-electricity-where-its>
- [5] Ignacio Mártel de la Plaza, «Historia de la energía eólica: del origen a la actualidad», BBVA. [En línea]. Disponible en: <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/historia-de-la-energia-eolica-del-origen-a-la-actualidad/>
- [6] AZ QUOTES, «Nikola Tesla Quotes About Energy», AZ QUOTES. [En línea]. Disponible en: [https://www.azquotes.com/author/14543-Nikola\\_Tesla/tag/energy](https://www.azquotes.com/author/14543-Nikola_Tesla/tag/energy)
- [7] MAURICIO ALVAREZ MACKAY, «TESIS: AEROGENERADORES: UNA ALTERNATIVA VIABLE PARA LA GENERACION DE ELECTRICIDAD», INVESTIGACIÓN, UNIVERSIDAD LA SALLE A. C., MEXÍCO, 1993. [En línea]. Disponible en: <https://tesiunamdocumentos.dgb.unam.mx/pmig2016/0199469/0199469.pdf>
- [8] Agencia Andaluza de la Energía, «Energía Eólica Guía Técnica». 2025. [En línea]. Disponible en: [https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/sites/default/files/Documentos/guia\\_tecnica\\_energia\\_minieolica.pdf](https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/sites/default/files/Documentos/guia_tecnica_energia_minieolica.pdf)

- [9] Alan Smith, «Why Does Wind Increase With Altitude?», 2023. [En línea]. Disponible en: [https://opensnow.com/news/post/why-does-wind-usually-increase-with-altitude?utm\\_source=chatgpt.com](https://opensnow.com/news/post/why-does-wind-usually-increase-with-altitude?utm_source=chatgpt.com)
- [10] DIEGO GALARZA y DAVID ROMÁN, «METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS FACTIBILIDAD DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE ENERGÍA EÓLICA», UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA, CUENCA, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/20022/1/UPS-CT009008.pdf>
- [11] Valsarj P, Drisya Alex Thumba, y Satheesh Kumar, «Machine learning-based simplified methods using shorter wind measuring masts for the time ahead wind forecasting at higher altitude for wind energy applications», Renewable Energy and Environmental Sustainability. [En línea]. Disponible en: [https://www.rees-journal.org/articles/rees/full\\_html/2022/01/rees220011/rees220011.html#:~:text=Para%20la%20extrapolaci%C3%B3n%20de%20la,la%20velocidad%20del%20viento%20vertical.](https://www.rees-journal.org/articles/rees/full_html/2022/01/rees220011/rees220011.html#:~:text=Para%20la%20extrapolaci%C3%B3n%20de%20la,la%20velocidad%20del%20viento%20vertical.)
- [12] «El Límite de Betz en la generación de Energía Eólica», ESingeniería. [En línea]. Disponible en: <https://esingenieria.net/el-limite-de-betz-en-la-generacion-energia-eolica/#:~:text=Este%20l%C3%ADmite%20se%20debe%20a,de%20manera%20eficiente%E2%80%8B%E2%80%8B.>
- [13] The National Physical Laboratory, «Measuring the density of air». [En línea]. Disponible en: <https://www.npl.co.uk/resources/q-a/how-is-air-density-determined>
- [14] Franklin Mendoza y Ing. Luis Ortiz, «¿Cómo se puede calcular la potencia de salida de un aerogenerador?», Linked in. [En línea]. Disponible en: <https://es.linkedin.com/advice/0/how-can-you-calculate-power-output-wind-turbine-viidf?lang=es#:~:text=1-,1%20F%C3%B3rmula%20de%20potencia,Mendoza%20L.>
- [15] Peter Lobner, «Altaeros Energies, Inc. – Buoyant Airborne Turbine (BAT)». 2024. [En línea]. Disponible en: [https://lynceans.org/wp-content/uploads/2024/11/Altaeros-Energies\\_BAT.pdf](https://lynceans.org/wp-content/uploads/2024/11/Altaeros-Energies_BAT.pdf)
- [16] «Novedades en el mundo Windfair: el aerogenerador flotante Altaeros», Windfair. [En línea]. Disponible en: <https://w3.windfair.net/wind-energy/news/17116-what-s-new-in-the-windfair-world-the-altaeros-buoyant-airborne-wind-turbine>

- [17] Peter Lobner, «Beijing Linyi Yunchuan Energy Technology Co., Ltd. – Stratospheric Floating Wind Power System (SAWES)». 2025. [En línea]. Disponible en: <https://lynceans.org/wp-content/uploads/2024/11/Beijing-SAWES-Energy-Technology-Co.pdf>
- [18] Doğan Güneş y Ergin Kükreer, «Performance Rating and Flow Analysis of an Experimental Airborne Drag-Type VAWT Employing Rotating Mesh», p. 21, 2024.
- [19] A.J. Paul, «A Comparative Analysis of the Two-Bladed and the Three-Bladed Wind Turbine for Offshore Wind Farms», Delft University of Technology, 2010. [En línea]. Disponible en: [https://repository.tudelft.nl/record/uuid%3A89a04724-2a02-4f43-8c0d-e42afcb989d1?utm\\_source=chatgpt.com](https://repository.tudelft.nl/record/uuid%3A89a04724-2a02-4f43-8c0d-e42afcb989d1?utm_source=chatgpt.com)
- [20] MINISTERIO DE ENERGIA Y RECURSOS NO RENOVABLES, «CENTRAL EÓLICA “VILLONACO”». 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.rekursyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2020/12/Web-Villonaco.pdf>
- [21] CELEC EP, «CENTRAL EÓLICA VILLONACO», CELEC EP. [En línea]. Disponible en: <https://www.celec.gob.ec/gensur/informacion-tecnica/central-eolica-villonaco/>
- [22] Jorge Andrés Narváez Hidalgo y Alexy Fabian Vinueza Lozada, «Diseño aerodinámico de álabes de 100 KW para aerogeneradores de eje horizontal ubicados en la zona del Cerro Villonaco». 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/5722/572261762009/html/>
- [23] SHANXI HUAXIN ELECTRIC CO.LTDA, «Innovate and Reliable Energy Saving Solutions». [En línea]. Disponible en: <https://hxindustrial.com/>

## Anexo 1, AutoCAD con modelados de altura



## Anexo 2, Excel con fórmulas para la obtención de resultados

The screenshot shows the Microsoft Excel interface with a spreadsheet titled 'Libro1 - Excel'. The spreadsheet contains two tables for wind turbine calculations. The first table is for 'Cálculo de potencia de salida' (Output power calculation) and the second is for 'Extrapolación de la velocidad del viento' (Wind speed extrapolation).

Cálculo de potencia de salida	
Datos	
Constante	0,5
Densidad kg/m <sup>3</sup>	
Longitud de aspas ( r )	
Área de barrido m <sup>2</sup>	0
Coefficiente de potencia (Cp)	
Velocidad (m/s)	
Total (kw)	0
$P = \frac{1}{2} * \rho * A * Cp * v^3$	

Extrapolación de la velocidad del viento	
Datos	
Altura conocida (m)	
Velocidad del viento conocida (m/s)	
Altura de la velocidad a calcular (m)	
Longitud de rugosidad (m)	
Total (m/s)	#DIV/0!
$V2 = V1 * \left(\frac{h2}{h1}\right)^{\alpha}$	