

**UNIVERSIDAD NACIONAL JOSÉ FAUSTINO
SÁNCHEZ CARRIÓN**

**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS, INDUSTRIAS
ALIMENTARIAS Y AMBIENTAL**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



**“CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPO DE AEROGENERADOR
SAVONIUS A NIVEL DE BANCO PARA OPTIMIZAR CAPTACIÓN
DE ENERGÍA EÓLICA”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO AMBIENTAL**

EDUARDO JOSÉ LÓPEZ MASIAS

HUACHO - PERÚ

2021

**UNIVERSIDAD NACIONAL JOSÉ FAUSTINO
SÁNCHEZ CARRIÓN**

**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS, INDUSTRIAS
ALIMENTARIAS Y AMBIENTAL**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**“CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPO DE AEROGENERADOR
SAVONIUS A NIVEL DE BANCO PARA OPTIMIZAR CAPTACIÓN
DE ENERGÍA EÓLICA”**

Sustentado y aprobado ante el Jurado evaluador



Dr. SERGIO EDUARDO CONTRERAS LIZA
Presidente



Dr. EDISON GOETHE PALOMARES ANSELMO
Secretario



Mg. Sc. TEODOSIO CELSO QUISPE OJEDA
Vocal



Dr. DIONICIO BELISARIO LUIS OLIVAS
Asesor

HUACHO – PERÚ

2021



Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión
Facultad de Ingeniería Agraria, Industrias Alimentarias y Ambiental

ACTA DE SUSTENTACIÓN VIRTUAL N°045-2021-FIAIAyA

ACTA DE SUSTENTACIÓN VIRTUAL DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL

En la ciudad de Huacho, el día 13 de julio del 2021, siendo las 10:00 horas en la sala virtual de la Facultad de Ingeniería Agraria, Industrias Alimentarias y Ambiental, se reunieron los miembros del Jurado Evaluador integrado por:

Presidente	Dr. SERGIO EDUARDO CONTRERAS LIZA	DNI N°08787108
Secretario	DR. EDISON GOETHE PALOMARES ANSELMO	DNI N°15605363
Vocal	Mg. Sc. TEODOSIO CELSO QUISPE OJEDA	DNI N° 20022994
Asesor	Dr. DIONICIO BELISARIO LUIS OLIVAS	DNI N°15651224

Para evaluar la sustentación virtual de la tesis titulada: **“PROTOTIPO DE AEROGENERADOR SAVONIUS A NIVEL DE BANCO PARA OPTIMIZAR CAPTACIÓN DE ENERGÍA EÓLICA”**

El postulante al Título Profesional de **Ingeniero Ambiental** don: **EDUARDO JOSE LOPEZ MASIAS**, identificado con DNI N°40032314, procedió a la sustentación virtual de Tesis, autorizada mediante Resolución de Decanato N°0347-2021-FIAIAyA de fecha 12/07/2021, de conformidad con las disposiciones vigentes. el postulante sí absolvió las interrogantes que le formularon los miembros del Jurado.

Concluida la sustentación virtual de Tesis, se procedió a la votación correspondiente resultando el candidato **APROBADO** Por **UNANIMIDAD** con la nota de:

CALIFICACIÓN		EQUIVALENCIA	CONDICIÓN
NÚMERO	LETRAS		
18	DIECIOCHO	EXCELENTE	APROBADO

Siendo las 11:45 horas del día 13 de julio del 2021, se dio por concluido el ACTO DE SUSTENTACIÓN VIRTUAL, de la Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Ambiental, inscrito en el folio N°190 del Libro de Actas



Dr. SERGIO EDUARDO CONTRERAS LIZA
Presidente



Dr. EDISON GOETHE PALOMARES ANSELMO
Secretario



Mg. Sc. TEODOSIO CELSO QUISPE OJEDA
Vocal



Dr. DIONICIO BELISARIO LUIS OLIVAS
Asesor

DEDICATORIA

A Elva mi abuela
por escucharme sin juzgarme.
a Frida mi madre por todo y más.
a Freddy por su paciencia y guía.
a mi hermana por decir mucho con poco.

AGRADECIMIENTO

A mi asesor Job Fiestas Urbina, por su dedicación, paciencia y guía en el proceso de elaboración de esta investigación, siempre lo tendré presente.

A Alexander Toyco y Fiorela Inocente quienes me escucharon cuando esto era una vaga idea, su aporte, crítica y apoyo.

A mis amigos “Los Luchos” que nunca dejaron de estar al tanto.

A todos los que con su apoyo hicieron posible la realización de este trabajo de investigación y su sustentación, eternamente agradecido.

ÍNDICE

Pág.:

DEDICATORIA	IV
AGRADECIMIENTO.....	V
ÍNDICE.....	VI
ÍNDICE DE TABLAS	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
RESUMEN	XIV
ABSTRACT	XV
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.1. DESCRIPCIÓN DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA	3
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.2.1. Problema general	3
1.2.2. Problemas específicos.....	3
1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	3
1.3.1. Objetivo general	3
1.3.2. Objetivos específicos	4
1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	4
1.5. DELIMITACIÓN DEL ESTUDIO.....	4
1.5.1. Delimitación técnica	4
1.5.2. Delimitación espacial	5
1.6. VIABILIDAD DEL ESTUDIO	5
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	6
2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.	6
2.1.1. Antecedentes internacionales	6
2.1.2. Antecedentes nacionales.....	7
2.2. BASES TEÓRICAS.	7
2.2.1. Los aerogeneradores	7

2.2.2.	Clasificación de los aerogeneradores según su campo de aplicación.....	8
2.2.3.	Clasificación según su eje de rotación.....	8
2.2.4.	Componentes de los aerogeneradores.....	11
2.2.5.	El viento y su energía	13
2.2.6.	Requerimientos y parámetros de proyecto.	16
2.3.	DEFINICIONES CONCEPTUALES	19
2.4.	HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN	20
2.4.1.	Hipótesis general.	20
2.4.2.	Hipótesis específicas.....	20
2.5.	OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	21
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA.....		22
3.1.	DISEÑO METODOLÓGICO	22
3.1.1.	Ubicación.....	22
3.1.2.	Área, sector y programa según los códigos del Plan Nacional de CTI	22
3.1.3.	Materiales e insumos	22
3.1.4.	Diseño experimental	24
3.1.5.	Tratamientos	24
3.1.6.	Características del área experimental	25
3.1.7.	Variable para evaluar.....	25
3.1.8.	Conducción del experimento	26
3.2.	POBLACIÓN Y MUESTRA	30
3.2.1.	Población	30
3.2.2.	Muestra	30
3.3.	TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	30
3.3.1.	Técnicas de recolección de datos.....	30
3.4.	TÉCNICAS PARA EL PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN.....	31
CAPÍTULO IV. RESULTADOS		32
4.1.	DETERMINACIÓN DE ECUACIÓN QUE RELACIONA EL PESO REAL Y VELOCIDAD DE VIENTO.....	32
4.2.	CÁLCULO DE TORQUE (N/M) VS VELOCIDAD DE VIENTO.....	40
4.3.	DETERMINACIÓN DE FÓRMULA DE VELOCIDAD ANGULAR (RAD/S) VS. VELOCIDAD DE VIENTO M/S.	42

4.4.	CÁLCULO DE POTENCIA DE VIENTO DISPONIBLE (W)	44
4.5.	CÁLCULO DE LA POTENCIA EXTRAÍDA (W_E)	46
4.6.	CÁLCULO DE CAPACIDAD DE POTENCIA (C_P)	47
4.7.	CÁLCULO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA PROYECTADA.	50
4.7.1.	Determinación del lugar y número de horas por velocidad de viento	50
4.7.2.	Determinación de factor de escala y parámetros de cálculo.....	50
4.7.3.	Cálculo de potencia de energía de viento disponible, energía de viento extraída, proyección de energía eléctrica que se generaría anualmente:	51
4.8.	CÁLCULO DEL AHORRO DE CO_2	53
CAPÍTULO V. DISCUSIÓN		56
	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	56
CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		57
6.1.	CONCLUSIONES	57
6.2.	RECOMENDACIONES	58
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		59
ANEXOS		61
	ANEXO 1. MATRIZ DE CONSISTENCIA	61
	ANEXO 2. INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN	62
	ANEXO 3. MATERIAL FOTOGRÁFICO	63
	ANEXO 3. PLANOS	85

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.:
Tabla 1. <i>Requerimientos para diseño del álabe y turbina</i>	16
Tabla 2. <i>Requerimientos para diseño de estructura de soporte de prototipo</i>	17
Tabla 3. <i>Requerimientos para diseño del sistema para medición de torque estático</i>	17
Tabla 4. <i>Operacionalización de variables</i> :	21
Tabla 5 <i>Características de las máquinas, dispositivos y herramientas utilizados</i>	22
Tabla 6 <i>Materiales utilizados</i>	23
Tabla 7 <i>Características de los instrumentos de medición utilizados</i>	23
Tabla 8. <i>Técnicas para procesamiento de la información</i>	31
Tabla 9 <i>Dimensiones de rotor para cálculo de torque de turbina</i>	32
Tabla 10. <i>Velocidades de viento del ventilador</i>	32
Tabla 11. <i>Fuerza medida y fuerza medida en cada posición de medición - SAVONIUS clásico</i> ... 33	
Tabla 12. <i>Fuerza medida y fuerza medida en cada posición de medición - PROTOTIPO A</i>	34
Tabla 13. <i>Fuerza medida y fuerza medida en cada posición de medición - PROTOTIPO B</i>	35
Tabla 14. <i>Fuerza medida y fuerza medida en cada posición de medición - PROTOTIPO C</i>	36
Tabla 15. <i>Fórmulas y R2 de los modelos evaluados en fuerza real</i>	39
Tabla 16. <i>Torque (N/m) de los modelos evaluados</i>	41
Tabla 17. <i>RPM y velocidad angular de los modelos evaluados</i>	42
Tabla 18. <i>Fórmulas y R2 de los modelos evaluados de velocidad angular</i>	43
Tabla 19. <i>Dimensiones de rotor para cálculo de potencia de viento disponible (W)</i>	44
Tabla 20. <i>Potencia de viento disponible (Wd) de los modelos evaluados</i>	45
Tabla 21. <i>Potencia de viento extraída (We) de los modelos evaluados</i>	46
Tabla 22. <i>Capacidad de potencia (Cp) de los modelos evaluados</i>	48
Tabla 23. <i>Comparación de Capacidad de potencia (Cp) de los modelos evaluados</i>	49
Tabla 24. <i>Escalamiento de dimensiones de rotor</i>	50

Tabla 25. <i>Dimensiones de rotor a escala x10 y parámetros de cálculo.</i>	50
Tabla 26. <i>Proyección de generación de energía eléctrica del parque eólico.</i>	52
Tabla 27. <i>Generación eléctrica nominal, balance de materia y energía – termoeléctrica, parque eólico.</i>	54
Tabla 28. <i>Producción anual de GEI según EIA y ahorro de parque eólico.</i>	55
Tabla 29. <i>Matriz de consistencia</i>	61
Tabla 30. <i>Formato registro de fuerza medida y cálculo de fuerza real</i>	62

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.:
<i>Figura 1.</i> Comparación de tipos de aerogeneradores	7
<i>Figura 2.</i> Aerogenerador híbrido.	10
<i>Figura 3.</i> Componentes de un aerogenerador	11
<i>Figura 4.</i> Esquema conceptual de un generador eléctrico.....	12
<i>Figura 5.</i> Límite de Betz respecto de distintos tipos de aerogenerador.	13
<i>Figura 6.</i> Límite de Betz respecto de distintos tipos de aerogenerador.	15
<i>Figura 7.</i> Ubicación del ventilador con relación a la estructura y el modelo (vista superior)..	24
<i>Figura 8.</i> Diagrama de flujo del proceso de diseño de los modelos, estructura y sistema de medición de fuerzas	26
<i>Figura 9.</i> Diagrama de flujo del proceso de ensamblaje y montaje de modelos, estructura y sistema de medición de fuerzas	27
<i>Figura 10.</i> Diagrama de flujo para el cálculo de capacidad de potencia de los modelos....	28
<i>Figura 11.</i> Diagrama de flujo para el cálculo de ahorro de CO ₂	29
<i>Figura 12.</i> Diagrama de fuerza para medición y cálculo de torque.	32
<i>Figura 13.</i> Línea de tendencia y fórmula, de modelo SAVONIUS clásico.	37
<i>Figura 14.</i> Línea de tendencia y fórmula, fuerza de álabes de modelo PROTOTIPO A....	38
<i>Figura 15.</i> Línea de tendencia y fórmula, fuerza de álabes de modelo PROTOTIPO B	38
<i>Figura 16.</i> Línea de tendencia y fórmula, fuerza de álabes de modelo PROTOTIPO C	39
<i>Figura 17.</i> Diagrama de fuerza.....	40
<i>Figura 18.</i> Gráfica de torque de los modelos evaluados.	42
<i>Figura 19.</i> Velocidad de viento Vs. velocidad angular del modelo SAVONIUS clásico y los PROTOTIPOS	43
<i>Figura 20.</i> Gráfica de potencia de viento disponible (W) de los modelos evaluados.....	44
<i>Figura 21.</i> Gráfica de potencia de viento extraída (We) de los modelos evaluados.	47

<i>Figura 22.</i> Gráfica de capacidad de potencia (Cp) de los modelos evaluados.....	49
<i>Figura 23.</i> Búsqueda de resolución de aprobación de EIA.....	53
<i>Figura 24.</i> Trazado en nylon.....	63
<i>Figura 25.</i> Machina para fresado de piezas en serie.....	63
<i>Figura 26.</i> Piezas cortadas.....	64
<i>Figura 27.</i> Proceso de taladrado.....	64
<i>Figura 28.</i> Proceso de torneado de piezas.....	65
<i>Figura 29.</i> Proceso de control de fabricación en torno y fresadora.....	66
<i>Figura 30.</i> Proceso de fabricación de soportes de álabes.....	67
<i>Figura 31.</i> Especificaciones de rodamiento cónico 30302.....	68
<i>Figura 32.</i> Especificaciones de rodamiento de bolas 625.....	68
<i>Figura 33.</i> Especificaciones de rodamiento de bolas 6202.....	69
<i>Figura 34.</i> Vista superior, frontal y posterior del montaje del proyecto.....	70
<i>Figura 35.</i> Ángulos de giro para evaluacion.....	70
<i>Figura 36.</i> Sistema para medir gr-fuerza.....	71
<i>Figura 37.</i> Medición de RPM con tacómetro digital.....	71
<i>Figura 38.</i> Medición de velocidad de viento con anemómetro digital.....	72
<i>Figura 39.</i> Perfil de álabes y configuración en la turbina respecto a la dirección del viento....	73
<i>Figura 40.</i> Viento medio anual a 10 m.....	74
<i>Figura 41.</i> Mapa de ubicación del Parque eólico <i>Proyectado</i>	75
<i>Figura 42.</i> Mapa de ubicación del Parque eólico <i>Proyectado</i>	76
<i>Figura 43.</i> Mapa de ubicación y elevación del Parque eólico <i>Proyectado</i> -corte este-oeste....	76
<i>Figura 44.</i> Aplicativo web del Ministerio de Energía y Minas (MINEM).....	77
<i>Figura 45.</i> Localidades cercanas al Parque eólico <i>proyectado</i>	78
<i>Figura 46.</i> Subestaciones/ líneas cercanas al Parque eólico <i>proyectado</i>	78

<i>Figura 47.</i> Número de horas por velocidad de viento en el Parque eólico proyectado.....	79
<i>Figura 48.</i> Número de horas por velocidad de viento en el Parque eólico proyectado.....	79
<i>Figura 49.</i> Número de horas por velocidad de viento en el Parque eólico proyectado.....	80
<i>Figura 50.</i> Dirección del viento en el Parque eólico proyectado.	80
<i>Figura 51.</i> Informe N° 073-2005-MEM-AAE/MU–Pág.3-Descripción del proyecto-GEI.	81
<i>Figura 52.</i> Principales indicadores del sector eléctrico a nivel nacional-setiembre 2019 ..	82
<i>Figura 53.</i> Principales indicadores del sector eléctrico a nivel nacional–setiembre 2019 .	83
<i>Figura 54.</i> Objetivos de Desarrollo sostenible (ONU)	84
<i>Figura 55.</i> Plano de ensamblaje de turbina SAVONIUS clásico (modelo cero)	85
<i>Figura 56.</i> SAVONIUS soporte de álabes	86
<i>Figura 57.</i> SAVONIUS álabes	87
<i>Figura 58.</i> SAVONIUS dado de arrastre	88
<i>Figura 59.</i> Plano de ensamblaje de PROTOTIPO	89
<i>Figura 60.</i> PROTOTIPO soporte de álabes superior	90
<i>Figura 61.</i> PROTOTIPO álabes.....	91
<i>Figura 62.</i> PROTOTIPO soporte de álabes inferior	92
<i>Figura 63.</i> PROTOTIPO, varillas de soporte y eje central	93
<i>Figura 64.</i> PROTOTIPO disco inferior.....	94
<i>Figura 65.</i> PROTOTIPO disco superior	95
<i>Figura 66.</i> PROTOTIPO arrastre superior	96
<i>Figura 67.</i> PROTOTIPO arrastre inferior	97

“CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPO DE AEROGENERADOR SAVONIUS A NIVEL DE BANCO PARA OPTIMIZAR CAPTACIÓN DE ENERGÍA EÓLICA”

Eduardo José López Masias¹, Luis Olivas Dionisio Belisario¹, Sergio Eduardo Contreras Liza¹, Edison Goethe Palomares Anselmo¹, Celso Teodosio Quispe Ojeda¹

RESUMEN

Objetivos: Optimizar la captación de energía eólica de la turbina de un aerogenerador tipo SAVONIUS, determinar la Capacidad de Potencia (C_p) del prototipo, hallar el incremento de la eficiencia (%), proyectar la generación eléctrica y el ahorro de CO_2 escalando el modelo más eficiente. **Materiales y métodos:** Se diseñó en gabinete, se fabricó en el taller de la empresa PROMAQ TRADE S.A.C., se ensambló y evaluó en el Laboratorio de Física N°1 de la Facultad de Ciencias en la Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión – Huacho y se proyectó la aplicación en gabinete (simulación matemática) – de la Zona sur de Huacho-Huaura-Lima Provincias, coordenadas 227085 E, 8751618 S, ZONA 18 S. El diseño de la tesis está basado en CONSTRUCCION Y EVALUACIÓN DE UN AEROGENERADOR DE EJE VERTICAL TIPO SAVONIUS (Fiestas Urbina, C. J.; Lizárraga Zavaleta, B. B.; Nunja García, J. V.; Quispé Ojeda, C.; Rojas Paz, J., 2016). Se construyó dos turbinas: la primera tipo SAVONIUS (clásico) de dos etapas en el mismo eje de giro, 0.2 metros de diámetro, 0.15 metros de altura (cada etapa) y 0.065 metros de traslape y la segunda un prototipo de aerogenerador tipo SAVONIUS modificado de una etapa, 4 álabes, 0.24 metros de diámetro, 0.18 metros de altura y separación ente álabes de 0.07 metros en la línea de eje. Se evaluó con vientos constantes de 2.9, 3.9 y 4.8 m/s. Se escaló el Prototipo x10, configurándolo con dos etapas por aerogenerador en un parque eólico de 10 aerogeneradores, se proyectó la generación eléctrica y el ahorro de CO_2 . **Resultados:** El Prototipo-C tiene una capacidad de potencia (C_p) de 0.43, el rango de velocidad de viento es de 2.5 m/s en adelante y es un 159% más eficiente que la turbina tipo SAVONIUS clásico. Se proyecta una generación de 91.84 MW-año y un ahorro de 254 689 TM/ CO_2 -año.

Palabras clave: Aerogenerador vertical, simulación matemática, ahorro de CO_2 .

¹Facultad de Ingeniería Agraria, Industrias Alimentarias y Ambiental, Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, Huacho – Perú.

" CONSTRUCTION OF SAVONIUS WIND GENERATOR PROTOTYPE AT BANK LEVEL TO OPTIMIZE WIND ENERGY CAPTATION "

Eduardo José López Masias¹, Luis Olivas Dionisio Belisario¹, Sergio Eduardo Contreras Liza¹, Edison Goethe Palomares Anselmo¹, Celso Teodosio Quispe Ojeda¹

ABSTRACT

Objectives: Optimize the wind energy capture of the turbine of a SAVONIUS type wind turbine, determine the Power Capacity (C_p) of the prototype, find the increase in efficiency (%), project electricity generation and CO₂ savings by scaling the model more efficient. **Materials and methods:** It was designed in a cabinet, manufactured in the workshop of the PROMAQ TRADE SAC company, assembled and evaluated in the Physics Laboratory No. 1 of the Faculty of Sciences at the José Faustino Sánchez Carrión - Huacho National University and projected the application in the office (mathematical simulation) - of the southern zone of Huacho-Huaura-Lima Provinces, coordinates 227085 E, 8751618 S, ZONE 18 S. The design of the thesis is based on CONSTRUCTION AND EVALUATION OF A VERTICAL AXIS WIND GENERATOR TYPE SAVONIUS (Fiestas, 2015). Two turbines were built: the first SAVONIUS type (classic) with two stages on the same axis of rotation, 0.2 meters in diameter, 0.15 meters in height (each stage) and 0.065 meters of overlap and the second a modified prototype SAVONIUS type wind turbine. single stage, 4 blades, 0.24 meters in diameter, 0.18 meters high and 0.07 meter spacing between blades on the axis line. It was evaluated with constant winds of 2.9, 3.9 and 4.8 m / s. The Prototype x10 was scaled, configuring it with two stages per wind turbine in a wind farm with 10 wind turbines, the electricity generation and CO₂ savings were projected. **Results:** The Prototype-C has a power capacity (C_p) of 0.43, the range wind speed is 2.5 m / s onwards and is 159% more efficient than the classic SAVONIUS type turbine. A generation of 91.84 MW-year is projected and a saving of 254 689 MT / CO₂-year.

Keywords: Vertical wind turbine, mathematical simulation, CO₂ savings.

¹Faculty of Agricultural Engineering, Food Industries and Environmental, National University José Faustino Sánchez Carrión, Huacho - Peru.

INTRODUCCIÓN

El Plan Energético Nacional 2014-2021 tiene como uno de sus desafíos electrificar zonas rurales donde viven 2.2 millones de personas, utilizando los Recursos Energéticos Renovables (RER) (MINEM, 2014, pág. 24), el cumplimiento de este desafío en específico y la diversificación de la matriz energética va acorde al cumplimiento de algunos de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (*Figura 54*) que Perú como miembro de las Naciones Unidas (ONU) se comprometió a cumplir para erradicar la pobreza, proteger el planeta y asegurar la prosperidad para todos, con metas a cumplir al 2030.

Es innegable la importancia de las centrales hidroeléctricas y termoeléctricas para el desarrollo del país más aún cuando estas producen el 41% y el 51% respectivamente (MINEM, Dirección general de Electricidad, Setiembre 2019) (*Figura 53-54*) pero la alteración del ciclo del agua como consecuencia del cambio climático, algún daño a la infraestructura por desastres naturales, rotura de las líneas de transporte del gas natural (causa natural u ocasionado por el hombre) son factores que podrían alterar la producción de energía eléctrica. Esta dependencia es incluso contraproducente para la seguridad nacional, razón por la cual es necesario diversificar la matriz energética.

Una alternativa a la dependencia de las centrales hidroeléctricas y termoeléctricas es la utilización de los RER como la energía solar, geotérmica, eólica, biomasa, mareo motriz y centrales hidroeléctricas (<20 MW), estas además de ser amigables al ambiente son fuentes de energía inagotable y/o resuelven problemas ambientales (como la ocasionada por la materia orgánica de los residuos sólidos) y generan trabajo en las distintas fases del proyecto (estudio, construcción, operación, cierre y abandono).

Para aprovechar la energía eólica (energía cinética del viento) se utilizan los aerogeneradores y son dos los tipos más usados: los de eje horizontal que son muy usados en parques eólicos, de gran rendimiento, rentables a vientos entre 6 a 10 m/s además de muy estudiados y los aerogeneradores de eje vertical usados para bajo requerimiento de energía, de bajo rendimiento, con vientos de operación de entre 3-6 m/s usualmente, robusto, de fácil construcción y mantenimiento además de aprovechar los vientos turbulentos. (*Figura 1*)

En este contexto se desarrolló un rotor (turbina) que rinda lo más eficientemente posible en vientos de velocidades entre 2.5 a 5 m/s (predominante en zonas de asentamientos

rurales), de fácil fabricación y mantenimiento, robusto y con el mínimo de material posible, acorde a esta necesidad el objetivo del trabajo de investigación fue diseñar, construir, evaluar y aplicar un prototipo de rotor de eje vertical tipo SAVONIUS a nivel de banco, para lo cual se diseñó y construyó un sistema para realizar mediciones de torque estático además de un túnel de viento, necesarios para el desarrollo de la etapa experimental, complementado con instrumentos de medición (balanza de resorte, anemómetro y tacómetro) de los cuales se registró la data.

CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción de la realidad problemática

Existen varias limitaciones para masificar en aprovechamiento de los Recursos Energéticos Renovables (RER), una de ellas son las políticas de estado y de gobierno que no incentiva y promueve el uso, investigación y desarrollo de las Energías Renovables, otra de las limitantes está relacionada a la eficiencia en la conversión de la energía (térmica, eólica, solar, mareomotriz) en energía mecánica que luego es convertida en energía eléctrica, esta eficiencia repercute en la rentabilidad.

En lo referido a energía eólica los grandes aerogeneradores operan a velocidades de viento de entre 6 y 12 m/s en pequeñas áreas y con no muchas horas anuales, pero hay viento de entre 3 y 6 m/s en áreas extensas (*Figura 40*) y con mayor número de horas anuales que no son aprovechadas porque los aerogeneradores que trabajan en este rango de viento son poco eficientes en la captación de la energía cinética del viento.

1.2. Planteamiento del problema

1.2.1. Problema general

- ¿Cuánto es posible optimizar la captación de energía eólica con el prototipo de aerogenerador SAVONIUS?

1.2.2. Problemas específicos

- ¿Cuál es el rango de velocidad de viento de operación del prototipo de aerogenerador SAVONIUS?
- ¿Cuál es el coeficiente de potencia (C_p) del prototipo de aerogenerador SAVONIUS?
- ¿Cuánto CO_2 es posible ahorrar con el prototipo de aerogenerador SAVONIUS?

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1. Objetivo general

- Optimizar la captación de la energía eólica con un prototipo de aerogenerador SAVONIUS.

1.3.2. Objetivos específicos

- Identificar el rango de velocidad de viento de operación del prototipo de aerogenerador SAVONIUS.
- Calcular el coeficiente de potencia (C_p) del prototipo de aerogenerador SAVONIUS.
- Proyectar el ahorro de CO_2 con el prototipo de aerogenerador SAVONIUS.

1.4. Justificación de la investigación

La eficiencia en la captación de la energía de viento de bajas velocidades es deficiente motivo por el cual no se toma en cuenta como fuente de energía, el presente estudio se enfoca en encontrar un perfil de alabe que tenga altos rendimientos en captación de energía del viento a bajas velocidades de viento, con lo cual se lograría diversificar y masificar el uso de la energía cinética del viento. Además, el poder operar a bajas velocidades puede instalarse en zonas rurales donde predominan vientos con estas características.

1.5. Delimitación del estudio

1.5.1. Delimitación técnica

1.5.1.1. Delimitación de diseño

Las dimensiones, materiales, el proceso de fabricación y los instrumentos de medición estuvieron delimitados por el presupuesto disponible sin que esto afectara la precisión y exactitud de las mediciones y la funcionabilidad del proceso de experimentación.

La menor cantidad de horas máquinas y horas hombre.

Materiales adecuados, que sean ligeros, resistentes, que se encuentren en el mercado y de costos accesibles.

Distribución de las piezas, para que no interfiera en el momento de inercia, los materiales de mayor peso tienen que ubicarse en (o cerca) del eje de giro.

1.5.1.2. Delimitación de construcción

No hubo limitaciones, se utilizaron las maquinarias, equipos, herramientas e instrumentos adecuados para la fabricación y ensamblaje de los modelos, túnel de viento y el sistema de medición de torque estático como se muestran en las

Figura 24 - 30 Los planos de las piezas y montaje se encuentran al final del apartado Anexos.

1.5.1.3. Delimitación de evaluación

La escala de medición de la balanza de resorte tiene una división de 2 gr con lo cual su grado de precisión es ± 1 gr. (*Figura 36*)

Tolerancia de fabricación de las barras para la toma de medidas es de ± 0.5 mm.

El ventilador utilizado tiene 3 velocidades de viento, I = 2.9 m/s, II = 3.9 m/s y III = 4.8 m/s. siendo estas velocidades las que se evaluó.

1.5.1.4. Delimitación de aplicación

Las velocidades de viento promedio que se utilizó fueron las proporcionadas por el aplicativo web del Ministerio de Energía y Minas (*Figura 44*) que se basan en información de estaciones meteorológicas los cuales son procesados aplicando la distribución de Weibull (método estadístico que determina la distribución de probabilidad continua).

1.5.2. Delimitación espacial

Fabricación de los componentes en el taller de máquinas herramientas de la empresa PROMAQ TRADE S.A.C., Calle las Fraguas 201 - Independencia – LIMA.

Ensamblaje y evaluación en el Laboratorio de Física #1 de la Facultad de Ciencias en la Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión – Huacho.

Aplicación/proyección (simulación matemática) – Zona sur de Huacho – Huaura – Lima Provincias coordenadas 227085 E, 8751618 S, ZONA 18 S. (*Figura 41-43*)

1.6. Viabilidad del estudio

El proyecto fue viable porque se contó con la información bibliográfica, experiencia en la construcción de prototipos, conocimientos teóricos prácticos por parte del Dr. Job Fiestas Urbina y habilidades en el manejo máquinas herramientas por parte del tesista.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación.

2.1.1. Antecedentes internacionales

Los aspectos ambientales son parte esencial del diseño y construcción de todo aerogenerador y parque eólico, si bien la energía eléctrica generada por energía eólica evita que por cada KWh se deje de emitir 0.60 kg de dióxido de carbono (CO₂), 1.33 gr de dióxido de azufre (SO₂) y 1.67 gr de óxido de nitrógeno (NO), existe también aspectos que afectan la percepción o el comportamiento humano (ruido, visual, interferencia electromagnética, uso de la tierra, residuos sólidos, salud humana) y aspectos ecológicos que se afectan por el diseño del aerogenerador y del parque eólico (flora y fauna, erosión del suelo y muy en especial aves migratorias). Geronimo (2010) menciona que un parque eólico de 10 MW evita 28 480 toneladas de CO₂ al año, sustituye 2 447 TEP (toneladas de equivalente de petróleo), aporta trabajo a 130 personas durante el diseño y la construcción.

Torres (2015) trabajó en un modelo de simulación de un aerogenerador Savonius con el software CAD SolidWorks, la validación del sistema eólico y sus componentes dan las siguientes dimensiones de diseño: 0.545 m diámetro de rotor, 0.307 m diámetro de cilindro, 1.090 m de altura, traslape de 0.068 m y 2 etapas en las condiciones ambientales de: 1450 m.s.n.m., 4,2 m/s de velocidad máxima promedio, 22°C temperatura ambiental y densidad de aire de 1,0 Kg/m³) obtuvo los siguientes parámetros de desempeño: 0.2 de coeficiente de potencia (C_p), 0.99 de eficiencia de los rodamientos, 0.95 de eficiencia del sistema de transmisión, 0.85 eficiencia eléctrica del generador y 0.84 de eficiencia del controlador. El diseño de la estructura contempla un eje central de 16 mm de diámetro. En resumen, se calculó las dimensiones del aerogenerador a partir de la realidad ambiental y de la potencia del viento que capta del viento.

El principio del aerogenerador tipo Lenz son el efecto Venturi que se explica por el Principio de Bernoulli y que se ve reflejado en el funcionamiento por sustentación del aerogenerador, además se supo incorporar el principio de arrastre que es típico de los aerogeneradores tipo Savonius. El proyecto de investigación resalta por la construcción de las álabes, transmisión y estator a partir de las fórmulas de diseño para el aerogenerador tipo Lenz con lo que se concluyó que es necesario un viento mínimo de 4 m/s para romper el estado de inercia del estator. (Espitia & Puerto, 2014)

2.1.2. Antecedentes nacionales

Fiestas (2016) en su trabajo de investigación (Diseño y Construcción de un Aerogenerador Tipo Savonius Multietapa.) realizado en la Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión – Huacho después de un proceso de diseño, construcción y evaluación de un aerogenerador de eje vertical tipo SAVONIUS obtuvo los siguientes parámetros de desempeño: ratio típico de velocidad $\lambda = 0.71$, torque estático (T_s) = 6.30 (N m), coeficiente de torque estático (CTs) = 0.69 y coeficiente de potencia (C_p) = 0.49 siendo el C_p el parámetro más relevante de la investigación. La densidad del aire durante la etapa experimental fue de 1.126 kg/m³. Destaca de esta investigación la metodología para medir el torque del rotor de la turbina, principios básicos de física y mecánica.

2.2. Bases teóricas.

2.2.1. Los aerogeneradores

Los distintos tipos y diseños de aerogeneradores obedecen a las características del viento de la zona donde será instalado y para los requerimientos energéticos requeridos.


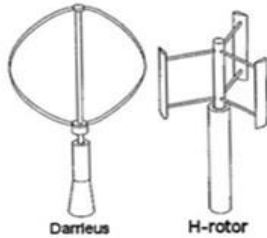
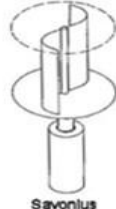
	Eje Horizontal	Eje Vertical Sustentación	Eje Vertical Arrastre
			
Ventajas	Eficiente Ampliamente probado Muy utilizado Más económico Muchos modelos	Eficiencia aceptable Indiferente a la dirección del viento Menos sensibilidad a turbulencia Crea pocas vibraciones	Producto probado Silencioso Robusto y fiable Indiferente a la dirección del viento Puede aprovechar flujos turbulentos Crea pocas vibraciones
Desventajas	No soporta adecuadamente cambios frecuentes en la dirección del viento No tolera bien vientos racheados	No muy probado Más sensible a la turbulencia que el Savonius	Baja eficiencia Económicamente costoso

Figura 1. Comparación de tipos de aerogeneradores

Fuente: Randall 2003, Timmers 2001, and Clear Skier 2003

2.2.2. Clasificación de los aerogeneradores según su campo de aplicación

2.2.2.1. *Sistemas aislados y autónomos*

Formados por microturbinas o pequeños aerogeneradores, tienen como función principal cubrir la demanda de energía de pequeños consumidores, en general núcleos aislados. En muchos casos estos sistemas, están asistidos por otras fuentes de energía (por ejemplo, por un grupo electrógeno Diesel o un sistema fotovoltaico) dando lugar a los llamados sistemas híbridos, otras veces la energía de apoyo la reciben directamente de la red eléctrica. Se distinguen dos grandes grupos de máquinas, todas ellas de eje horizontal: las eólicas lentas (multipala), usadas para el bombeo directo de agua, y las eólicas rápidas (bipala o tripala), empleadas para la producción de electricidad a través de un generador eléctrico síncrono o asíncrono accionado por el rotor de la máquina eólica.

2.2.2.2. *Parques eólicos*

Están formados por un conjunto de aerogeneradores de gran potencia, y su función es la de actuar como una central de producción eléctrica para su inyección a la red de alta tensión. Se distinguen dos grandes grupos de parques eólicos: los ubicados en la superficie terrestre (onshore) y los instalados en plataformas marinas (offshore) a una distancia de algunos kilómetros de las costas (entre 1 y 20 km). Los aerogeneradores usados son todos de eje horizontal y principalmente de tres palas (los bipala se utilizan poco), la gran mayoría de ellos giran a velocidad de rotación constante, manteniendo la velocidad del extremo de la pala acotada a unos 65 m/s para limitar el impacto sonoro

2.2.3. Clasificación según su eje de rotación

Los aerogeneradores de eje vertical: tienen los ejes principales perpendiculares al suelo. Una ventaja de este uso es que captan el viento en cualquier dirección, por tanto, no necesitan un control de orientación, además el generador eléctrico se puede encontrar situado en el suelo reduciendo así el coste y la complejidad estructural. Su principal desventaja es que la producción energética es menor que la de los de eje horizontal. Existen tres tipos de aerogeneradores verticales como son Savonius, H-rotor y Darrieus. (Luque, 2017)

2.2.3.1. *Darrieus:*

Patentadas por G. Darrieus el año 1931 y desarrolladas luego por el Laboratorio Sandia en los años 70. Están formados por dos o tres palas de forma ovalada de perfil aerodinámico y tienen características parecidas a las de eje horizontal, presentando un par de arranque muy pequeño. Los laboratorios Sandia construyó en 1974 un primer prototipo de 5 m de diámetro Su potencia es pequeña y aunque su aplicación es similar a los aerogeneradores rápidos de eje horizontal, están poco implantados. (Torres, Morimitsu D., 2015)

2.2.3.2. *Savonius:*

Patentada por el finlandés Sigurd Savonius en 1922. Su principal ventaja consiste en trabajar con velocidades de viento muy bajas. Se compone de dos semicilindros de igual diámetro situados paralelamente al eje vertical de giro, en el diseño original estaban separados una pequeña distancia el uno del otro. La fuerza que el viento ejerce en las caras de los cilindros (cara cóncava y cara convexa) es distinta, por lo que las hace girar alrededor del eje. Este sistema presenta buenas características aerodinámicas para el autoarranque y la autorregulación. Su campo de aplicación está en la producción autónoma de electricidad o el bombeo de agua. (Torres, Morimitsu D., 2015)

2.2.3.3. *Sistema híbrido*

Es una combinación entre un modelo Savonius y un Darrieus. El aerogenerador Darrieus arranca con velocidades más altas que el Savonius; debido a ello se puede hacer una combinación sobre un mismo eje de ambas máquinas, de forma que el Savonius actúe durante el arranque y el Darrieus sea el que genere la energía para mayores velocidades del viento. (Torres, Morimitsu D., 2015)



Figura 2. Aerogenerador híbrido.
Fuente: Torres Morimitsu, 2015

Los aerogeneradores de eje horizontal poseen los ejes principales situados paralelamente al suelo. Por lo general tienen 3 aspas. Se instalan en lo alto, donde nada obstruye las corrientes de viento y donde alcanzan velocidades mayores que en la superficie, esto se traduce en mayor producción de energía. Este generador es el más usado en la actualidad además del más estudiado. (Luque, 2017)

2.2.3.4. Aerogeneradores lentos

En general, están constituidos por un número alto de palas, multipalas, que cubren casi toda la superficie del rotor. Poseen un elevado par de arranque, gracias al cual pueden ponerse en marcha incluso con velocidades de viento muy bajas. Su baja velocidad de rotación hace que sean poco útiles para la producción de electricidad, siendo su uso más frecuente para el bombeo de agua. (Torres, Morimitsu D., 2015)

2.2.3.5. Aerogeneradores rápidos

Presentan un par de arranque pequeño y requieren velocidades de viento del orden de 4 a 5 m/s para su puesta en marcha. La mayoría poseen tres palas y se utilizan para la producción de electricidad, a través de su acoplamiento con un alternador. Su gama de potencias es muy amplia. (Torres, Morimitsu D., 2015)

Aerogeneradores de velocidad intermedia: Tienen entre 3 y 6 palas y sus prestaciones están comprendidas entre las correspondientes a los dos casos anteriores. Se utilizan cuando las condiciones de viento no son muy favorables y

en general son de pequeña potencia. Su aplicación principal es en equipos autónomos para producción de electricidad. (Torres, Morimitsu D., 2015)

2.2.4. Componentes de los aerogeneradores

Un aerogenerador funciona bajo el principio de conservación de la energía, que indica que la energía no se crea ni se destruye, solo se transforma, para lograrlo el aerogenerador se vale de sistemas, que captan la energía cinética del viento, la transmiten en forma de energía mecánica y la transforma en energía eléctrica.

Se debe tener en cuenta que ningún sistema transmite la energía en su totalidad porque tiene pérdidas por rozamiento, por aerodinámica, en forma de calor y por radiación.

2.2.4.1. Sistema de captación (turbina)

“Es el encargado de transformar la energía cinética del viento en energía mecánica de rotación. Está integrado por el rotor, el cual se compone principalmente de los álabes, las tapas y el árbol.” (Torres, Morimitsu D., 2015)

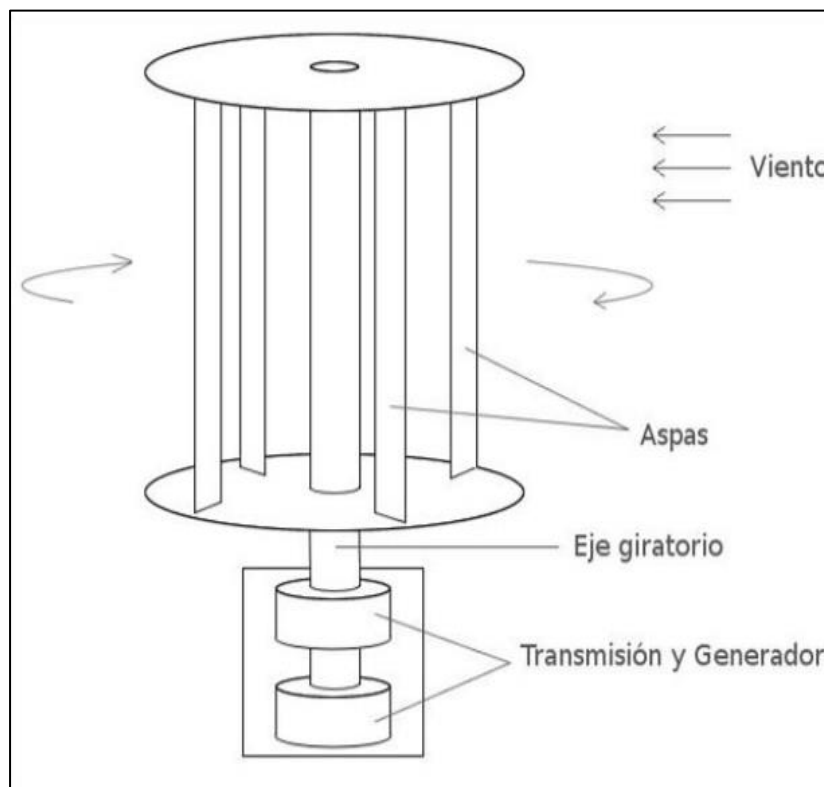


Figura 3. Componentes de un aerogenerador
Fuente: Torres Morimitsu, 2015

2.2.4.2. Sistema de transmisión mecánica

Toda turbina tiene un árbol principal, algunas veces denominado árbol de baja velocidad o árbol de rotor. El árbol principal transfiere el par torsor desde el rotor al resto del tren de potencia. Los acoplamientos tienen como función conectar los árboles. El multiplicador tiene como función adaptar la baja velocidad de rotación del eje del rotor a las mayores velocidades de operación del generador eléctrico. (Torres, Morimitsu D., 2015)

2.2.4.3. Sistema de generación eléctrica

Este se refiere al generador, el cual está acoplado al eje para transformar la energía mecánica en eléctrica. Generalmente se utilizan diferentes tipos de generadores, los cuales pueden ser síncronos o asíncronos, de jaula de ardilla o doblemente alimentados, con excitación o con imanes permanentes. (Gerónimo, 2010)

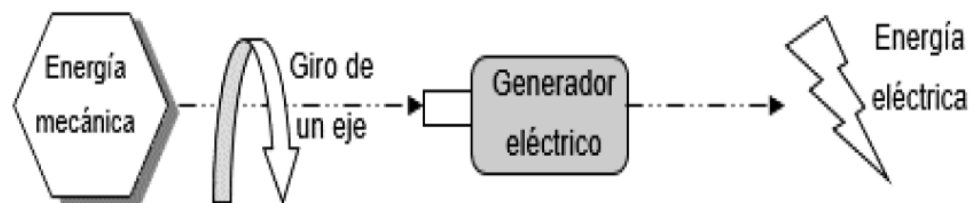


Figura 4. Esquema conceptual de un generador eléctrico
Fuente: Torres Morimitsu, 2015

Hay diferencias entre los generadores síncronos y asíncronos. Los últimos se emplean más, ya que pueden conectarse directamente a la red y son más robustos y de menos mantenimiento. Un generador sincrónico de velocidad constante conectado a la red presenta problemas técnicos muy difíciles de eliminar. Por lo anterior, actualmente no existen generadores sincrónicos de velocidad constante, sino de velocidad variable. Este no se puede conectar directamente a la red de corriente alterna con frecuencia constante, por lo que es preciso utilizar un convertidor de frecuencia como elemento intermedio entre el generador y la red. Esta desventaja de tener que utilizar un complicado sistema adicional para la sincronización se compensa con una mayor eficiencia de la turbina y una mejor compatibilidad con la red. (Geronimo, 2010)

2.2.4.4. Sistema de almacenamiento de energía

El almacenamiento de energía persigue un objetivo principal: conseguir que la generación de electricidad no tenga que producirse en el mismo momento en que la demandan los consumidores. De este modo, es posible recuperar la energía

generada y almacenarla para ser utilizada luego. Para tal fin, se usan baterías capaces de almacenar la energía producida por el sistema eólico. (Torres, Morimitsu D., 2015)

2.2.5. El viento y su energía

2.2.5.1. Velocidad de viento

La velocidad del viento, V , es una magnitud vectorial. Aunque el vector de la velocidad tiene tres componentes, en aplicaciones de energía eólica solo se consideran las componentes en el plano horizontal (plano paralelo a la superficie terrestre). La velocidad del viento se caracteriza por el módulo de la componente de la velocidad en el plano horizontal y su dirección. (Villarubina, 2013)

2.2.5.2. Ley de conservación de la materia

La ley de conservación de la masa (o de la materia) establece que la masa no se crea ni se destruye. La conservación de la masa y la conservación de la energía constituyen la base para dos herramientas utilizadas con frecuencia en el balance de masa y el balance de energía.

2.2.5.3. Cálculo de eficiencia de un aerogenerador - Ley de Betz

Según el análisis realizado por Betz (1926), se puede deducir la eficiencia de un aerogenerador esquematizado en la *Figura 1*.

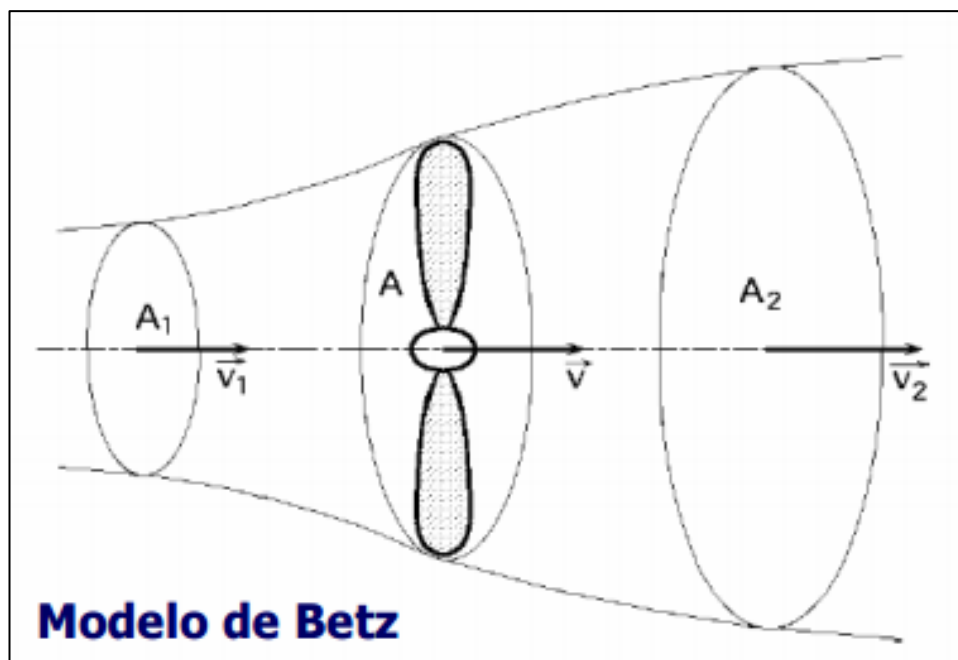


Figura 5. Límite de Betz respecto de distintos tipos de aerogenerador.

Recuperado de: <https://hidrolate.wordpress.com/tema/>

Por conservación de masa se sabe que el caudal másico (Q_m) es constante, es decir:

$$Q_m = \rho Q = \rho A_1 v_1 = \rho A_2 v_2 = \rho A v \quad (1)$$

Se puede expresar la potencia útil transferida por el viento de dos formas. La primera se puede expresar como la pérdida por unidad de tiempo, de energía cinética del viento al pasar por la bomba, como en la siguiente ecuación.

$$P_{util} = \frac{-\Delta E_k}{\Delta t} = \frac{E_{k1} - E_{k2}}{\Delta t} = \frac{\rho A d (v_1^2 - v_2^2)}{\Delta t} = \frac{1}{2} \rho A v (v_1^2 - v_2^2) \quad (2)$$

También se puede expresar la potencia en función de la fuerza del viento sobre el área A como.

$$P_{util} = F v = \frac{\rho A d (v_1 - v_2)}{\Delta t} v = \rho A v^2 (v_1 - v_2) \quad (3)$$

De las ecuaciones (2) y (3) se obtiene que:

$$\frac{1}{2} \rho A v (v_1^2 - v_2^2) = \rho A v^2 (v_1 - v_2)$$

Es decir, que:

$$v = \frac{(v_1 + v_2)}{2} \quad (4)$$

Insertando la ecuación (4) en (2) y haciendo que $v_2 = b v_1$ con $0 < b < 1$ se obtiene:

$$P_{util} = \frac{1}{2} \rho A \left(\frac{v_1 + b v_1}{2} \right) (v_1^2 - b^2 v_1^2) = \frac{1}{4} \rho A v_1^3 (1 + b)(1 - b^2) \quad (5)$$

Seguendo los cursos de cálculo se sabe que el máximo se obtendrá derivando con respecto a b e igualando a 0 y por tanto:

$$(1 - b^2) + (1 + b)(-2b) = (1 + b)(1 - 3b) = 0$$

Esta expresión tiene 2 soluciones pero la única consistente físicamente es que $b = 1/3$. Sustituyendo en (5) nos queda que:

$$P_{util} = \left(\frac{16}{27} \right) \frac{1}{2} \rho A v_1^3$$

Y por lo tanto la eficiencia ideal a la que se puede llegar es de 59% (Limite de Betz).

$$C_p^{Betz} = \frac{16}{27} \approx 59\%$$

A pesar de lo anterior dicho límite no considera pérdidas de energía, interferencia y resistencia. Por lo tanto un valor real estaría bordeando el 46%. Como se puede apreciar en la figura el coeficiente de potencia C_p puede graficarse en función de λ (Arrastre-Sustentación). De esta forma se obtiene que la turbina con mayor eficiencia es la de 3 palas, utilizada en su mayoría actualmente. (HIDROLATE, 2020)

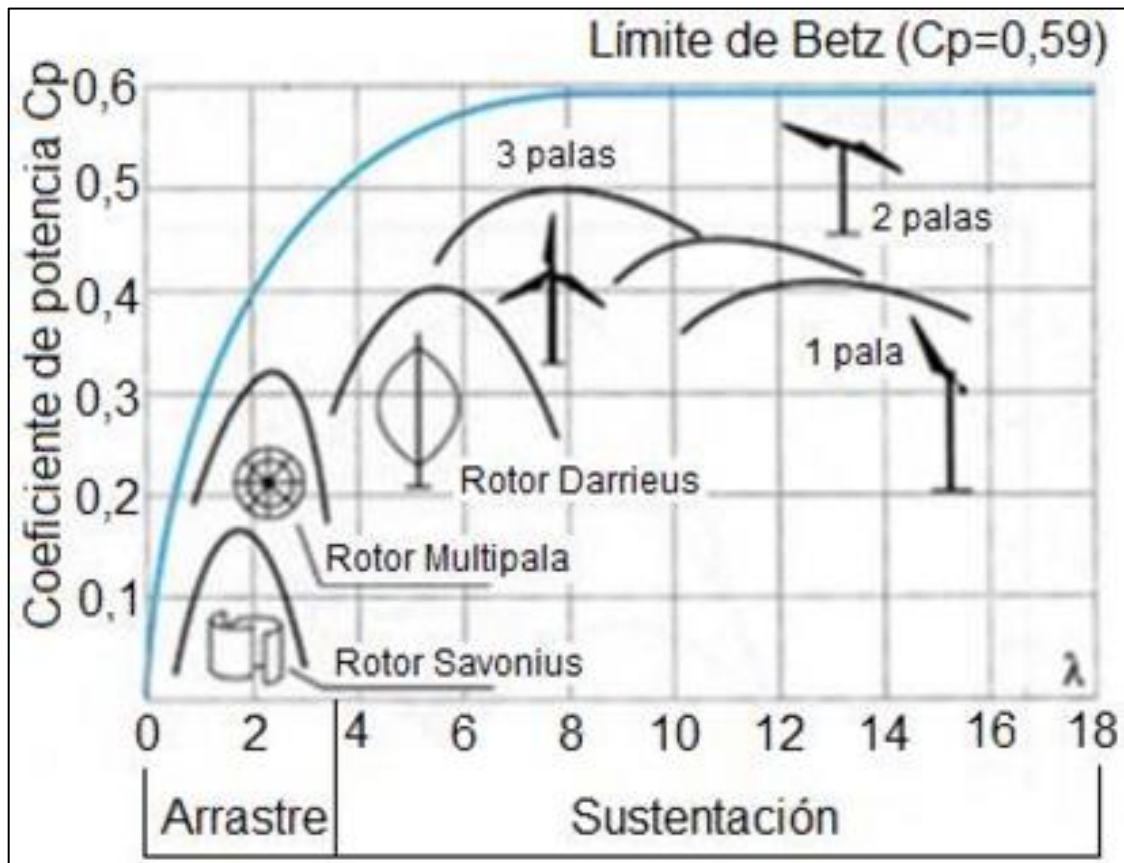


Figura 6. Límite de Betz respecto de distintos tipos de aerogenerador.

Recuperado de: <https://hidrolate.wordpress.com/tema/>

2.2.6. Requerimientos y parámetros de proyecto.

Obedece a requisitos contemplados dentro de las delimitaciones, el objetivo general y los específicos.

2.2.6.1. Diseño

Tabla 1.

Requerimientos para diseño del álabes y turbina.

REQUERIMIENTOS DE DISEÑO	JUSTIFICACIÓN DEL REQUERIMIENTO Y PARÁMETROS
Fácil fabricación	Una fabricación sencilla conlleva a menos horas máquina que se traduce en menor consumo de electricidad y por ende menor generación de gases de efecto invernadero (GEI).
Álabes que mejoren la captación del viento y reduzcan la resistencia a la rotación	Los aerogeneradores SAVONIUS tienen como principal desventaja el ser poco eficiente para transformar la energía cinética del viento en energía mecánica, debido a la distribución de los álabes, una de ellas capta la energía del viento en favor de la rotación y la otra en posición opuesta, en contra de la rotación, tener en cuenta que ambas superficies tienen la misma área. El giro del aerogenerador se da por la forma cóncava y convexa en relación con la dirección del viento que impacta con el aerogenerador.
Aprovechamiento eficiente de los vientos de baja velocidad	Si bien los vientos de mayor velocidad son los que tienen mayor energía cinética son también los que menos horas anuales tienen, por el contrario, el viento de menor velocidad (menor energía cinética) son de más horas anuales.
Fácilmente reusable y/o sustentable	Cuando el aerogenerador (parque eólico) termine con su vida útil todos los componentes serán retirados y dispuestos según la clasificación de residuo sólido por este motivo el diseño tiene que utilizar la menor cantidad de materiales y que estos se puedan reusar o reciclar.
Que dirija el viento donde se quiere	Todos los modelos de aerogeneradores utilizan el viento en la dirección que viene del viento, el diseño del aerogenerador tiene que dirigir el viento que tiende a frenar la rotación en pro de un incremento en la velocidad de rotación.
Bajo costo	Con un bajo costo de fabricación, instalación y mantenimiento del rotor se puede destinar el ahorro a la implementar un sistema de generación eléctrica más eficiente, además con un bajo costo sería más accesible para zonas rurales donde aún no llega la electrificación.
Rentable	La rentabilidad de un aerogenerador es directamente proporcional a la capacidad de potencia (C_p).

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2.
Requerimientos para diseño de estructura de soporte de prototipo.

REQUERIMIENTOS DE DISEÑO	JUSTIFICACIÓN DEL REQUERIMIENTO Y PARÁMETROS
Estructura	Simple y ligera para que pueda ser manipulada y transportada con facilidad y a la vez rígida para que no pierda su forma ni propósito.
Bajo costo	Al no ser un componente de un modelo el margen de tolerancia en las medidas es amplio y en cuanto al material puede ser cualquiera que cumpla los requerimientos de estructura.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.
Requerimientos para diseño del sistema para medición de torque estático

REQUERIMIENTOS DE DISEÑO	JUSTIFICACIÓN DEL REQUERIMIENTO Y PARÁMETROS
Precisión y exactitud	Las mediciones tienen que realizarse en el plano horizontal para que la fuerza de la gravedad no interfiera con la medición.
Soporte de instrumento de medición	Tiene que adecuarse a la forma y tamaño del instrumento de medición. Con el mínimo de piezas posibles Su diseño tiene que garantizar rigidez ya que movimientos no deseados provocan un error en la medición.
Brazos de medición	Ligeros en peso para que no afecte la medición. Que soporte esfuerzos tangenciales al eje de giro y no se deforme El centro de los agujeros a taladrar en los brazos de medición debe tener la misma separación para garantizar la transmisión de las fuerzas por el principio de palanca $b m_1 = d_1 \times f_1 = d_2 \times f_2 = b m_2$
Cable soporte de pesas	El cable soporte de pesas tiene que ser lo suficientemente flexible para que pueda adquirir la forma de una polea de diámetro pequeño además su estructura tiene que soportar el peso de las pesas patrón sin romperse ni deformarse. El cable soporte de pesas y los brazos de medición se utilizarán en un primer momento para encontrar el error de medición del dispositivo de medición de torque estático, de esto depende que la medición sea la más exacta posible.

Fuente: Elaboración propia.

2.2.6.2. Construcción

Para la fabricación de los componentes se utilizaron maquinas herramientas (torno, fresadora, taladro de columna) y dispositivos (plato divisor, prensa) (*Figura 27-30*)

La fabricación se realizó según los planos de diseño; se fabricó una machina para el maquinado en serie las piezas que dan forma al perfil del prototipo (*Figura 25*)

La estructura se realizó en un taller de estructuras metálicas .

El ensamblaje de los componentes se realizó en el Laboratorio #1 de Física de la Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión – Huacho (*Figura 34*)

2.2.6.3. Evaluación

Acondicionamiento para evaluación

El eje central niveló perpendicular al suelo y al viento generado por el ventilador.

Después de cada cambio en el selector de velocidad del ventilador se esperó que la velocidad estabilice antes de registrar la magnitud que indicaron los instrumentos (velocidad de viento, RPM y fuerza) (*Figura 35-38*).

Evaluación de los álabes.

La evaluación consistió en registrar los datos de torque estático vs velocidad de viento cada 15° hasta completar el giro de la turbina y registrar las revoluciones por minutos (RPM) vs. velocidad de viento. Después se desarrollaron las ecuaciones para determinar la Capacidad de potencia (C_p) de cada modelo evaluado.

Se utilizó la misma metodología de evaluación para los álabes del aerogenerador SAVONIUS clásico y los PROTOTIPOS A, B Y C.

2.2.6.4. *Aplicación.*

La aplicación consistió en el cálculo de la energía eléctrica que se podría generar con el prototipo de aerogenerador SAVONIUS en un punto geográfico específico del cual se conoce la cantidad de horas de velocidades de viento anuales y calcular la cantidad de CO₂ que se deja de generar anualmente comparándola con una fuente (y proceso) generadora de energía eléctrica.

Se realizó el siguiente procedimiento:

1. Se determinó del lugar que presente las condiciones para la instalación de un parque eólico (*Figura 41-50Figura 50*).
2. Se estableció el factor de escala del prototipo (Tabla 24).
3. Se calculó la potencia de energía de viento disponible, la energía de viento que se aprovecha (utilizando el Cp) y la energía eléctrica que se generaría anualmente (Tabla 26).
4. Se relacionó la energía eléctrica generada por el parque eólico con la generada por una termoeléctrica de ciclo combinado (utiliza gas natural en su proceso) y calcular la cantidad de GEI. (*Figura 51*)
5. Se relacionó la energía eléctrica generada por el parque eólico con la generada por una termoeléctrica de ciclo combinado (utiliza gas natural en su proceso) y se halló la cantidad de CO₂ que se dejaría de emitir a la atmósfera (Tabla 28).

2.3. Definiciones conceptuales

- **Modelo:** "...puede ser entendido como una representación, bien sea abstracta, análoga, fenomenológica o idealizada, de un objeto que puede ser real o ficticio. Para cada caso y por la naturaleza de cada caso, se podrán trabajar modelos fenomenológicos y/o modelos de procesos que requieren el uso formal de herramientas matemáticas y/o computacionales para representar algún sistema y su comportamiento." (Figuroa, 2021)
- **Modelamiento:** Aprendizaje por imitación a través de un modelo. También denominado aprendizaje vicario.
- **Simulación:** "...la imitación de la operación de un proceso del mundo real o sistema sobre el tiempo. La simulación comprende la generación de una historia artificial de un sistema, y la observación de tal historia artificial con el fin de

extraer inferencias concernientes a las características de operación del sistema real representado”. (Figueroa, 2021)

- **Torque estático:** El torque es la fuerza aplicada en una palanca que hace rotar alguna cosa.
- **Coefficiente de potencia (Cp):** Indica la eficiencia para aprovechar la energía cinética del viento.
- **Potencia:** Es el trabajo realizado por unidad de tiempo o la cantidad de energía transferida por unidad de tiempo. Sistema internacional (W)
- **Flujo másico:** Es la magnitud física que expresa la variación de la masa con respecto al tiempo en un área específica.

2.4. Hipótesis de investigación

2.4.1. Hipótesis general.

H1: Con el prototipo de aerogenerador SAVONIUS NO se optimiza a captación de energía eólica.

H0: Con el prototipo de aerogenerador SAVONIUS se optimiza a captación de energía eólica.

2.4.2. Hipótesis específicas.

Es posible identificar el rango de velocidad de viento de operación del prototipo de aerogenerador SAVONIUS

Es posible calcular el coeficiente de potencia (Cp) del prototipo de aerogenerador SAVONIUS.

Es posible proyectar el ahorro de CO₂ del prototipo de aerogenerador SAVONIUS

2.5. Operacionalización de variables

Tabla 4.

Operacionalización de variables:

“Construcción de Construcción de prototipo de aerogenerador SAVONIUS a nivel de banco para optimizar captación de energía eólica”

VARIABLE	PROBLEMA	DEFINICIÓN	DIMENSIÓN	SUB - DIMENSIÓN	INDICADORES	TIPOS
Variable independiente Prototipo de aerogenerador SAVONIUS a nivel de banco	¿Cuánto es posible optimizar la captación de energía eólica con el prototipo de aerogenerador SAVONIUS?	Máquina que transforma energía cinética del viento en energía mecánica primero y energía eléctrica después, con eje de giro en posición vertical, funciona bajo el principio de araste y álabes que se direccionan a favor del viento	Diseño	Dimensiones	Medidas (m)	Nominal
				Materiales por pieza	Adecuado No adecuado	cualitativa Ordinal
				Potencia	Potencia nominal del diseño (W)	Nominal
			Construcción	Precisión de construcción por pieza (tolerancia)	Poca tolerancia (0.1 mm) Mucha tolerancia (0.5 mm)	cuantitativo continuo
Variable dependiente Optimización de captación de energía eólica.	¿Cuál es el rango de velocidad de viento de operación del prototipo de aerogenerador SAVONIUS?	Incremento de los indicadores de captación de la energía cinética del viento.	Evaluación	Frecuencia de giro	Revoluciones por minutos (RPM)	Intervalo
				Torque estático	Momento fuerza (Nm)	Nominal
	¿Cuál es el coeficiente de potencia (Cp) del prototipo de aerogenerador SAVONIUS?		Eficiencia de conversión	Coefficiente de potencia (Cp) adimensional	Nominal	
			¿Cuánto CO2 es posible ahorrar con el prototipo de aerogenerador SAVONIUS?	Aplicación (simulación - proyección)	Generación eléctrica anual proyectada	KW/año
		Equivalencia de generación de CO ₂ de distintas fuentes de energía eléctrica		Kg. CO ₂ /Kw*h	Nominal	

Fuente: Elaboración propia., 2020.

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

3.1. Diseño metodológico

3.1.1. Ubicación

Fabricación de los componentes en el taller de máquinas herramientas de la empresa PROMAQ TRADE S.A.C., Calle las Fraguas 201 - Independencia – LIMA.

Ensamblaje y evaluación en el Laboratorio de Física #1 de la Facultad de Ciencias en la Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión – Huacho.

Aplicación/proyección (simulación matemática) – de la Zona sur de Huacho – Huaura – Lima Provincias coordenadas 227085 E, 8751618 S, ZONA 18 S. (*Figura 41-44*)

3.1.2. Área, sector y programa según los códigos del Plan Nacional de CTI

Área: 03 AMBIENTAL

Sector: 0303 ENERGÍA

Programa: 0303 0002 Sistemas eólicos menores de bombeo de agua y de generación de electricidad para uso doméstico y productivo.

Proyecto: CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPO DE AEROGENERADOR SAVONIUS A NIVEL DE BANCO PARA OPTIMIZAR CAPTACIÓN DE ENERGÍA EÓLICA.

3.1.3. Materiales e insumos

Tabla 5

Características de las máquinas, dispositivos y herramientas utilizados

MÁQUINAS Y DISPOSITIVOS	ESPECIFICACIONES Y USO	CANTIDAD
Torno paralelo	Volteo 300 mm y 1 m entre centros	1
Fresadora vertical	Max. 2210 X 1570 X 1930 mm	1
Taladro de mesa	Taladro de banda de 8”	1
Plato divisor	Ø 320 mm	1
Prensa	Para taladro	1
Machos y terraja	3/16	1

Fuente: elaboración propia

Tabla 6
Materiales utilizados

MATERIALES	ESPECIFICACIONES Y USO	CANTIDAD
	Cod. 625 Ø 5 x Ø 16 x 5 mm	9
Rodamientos	Cod 6202 Ø 15 x Ø 35 x 11 mm	1
	Cod. 30303 Ø 15 x Ø 42 x 22.4 mm	1
Plancha de Nylon	0.6 m x 0.5 m x ½ pulgada de espesor	1
	Ø 28 cm x 3/8 pulgada de espesor	1
Micas varias	Plancha de 46cm x 54 cm x 5 mm	2
	Plancha de 44.5cm x 50 cm x 5 mm	2
Varillas	Acero plata CV Red Ø 5 mm x 1 m	1
Eje central	Acero plata Amutit Red Ø 5/8" x 70 cm.	1
	Ø 95 mm x 25 mm (soporte superior de rodamiento)	1
Discos de aluminio	Ø 95 mm x 35 mm (soporte inferior de rodamiento)	1
	Ø 110 mm x 50 mm (para construcción de los arrastres)	1
Pernos	Perno socket 3/16 x 3/4	8
	Perno socket 3/16 x 1 ½	36
Barra de perfil en		
L Estructura (especificar)	50 cm x 60 cm x 50 cm (ancho, alto, profundidad)	1
Plancha de fierro	230 mm x 120 mm x 10 mm (machina)	1

Fuente: elaboración propia

Tabla 7
Características de los instrumentos de medición utilizados

INSTRUMENTOS	ESPECIFICACIONES	CANTIDAD
Calibrador Vernier	6"	1
	12"	
Reloj comparador	10 mm x 0.01 mm	1
Reloj palpador	1 mm x 0.01 mm	1
Balanza	Balanza de resorte de 1.00 Kg. de capacidad	1
Anemómetro	0 a 30 m/s 0.1 m/s	1
Tacómetro	2.5 a 999.9 RPM 0.1 RPM	1

Fuente: elaboración propia

3.1.4. Diseño experimental

Para el proceso de evaluación se utilizó un ventilador de mediana potencia de 3 velocidades que simuló el viento en condiciones controladas.

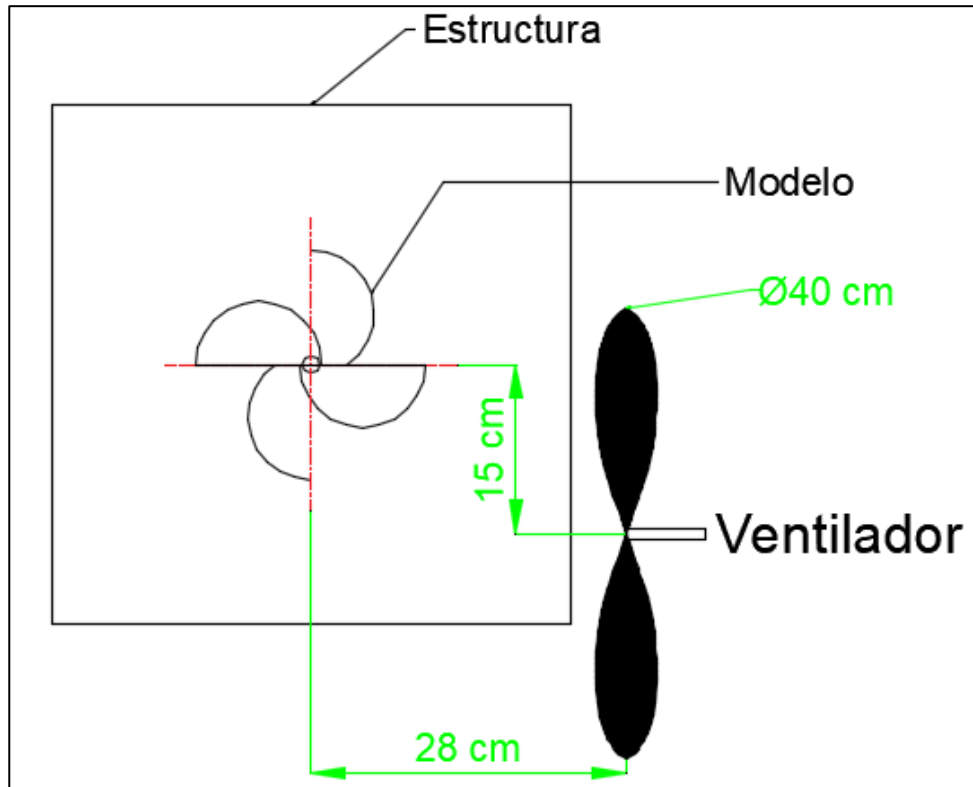


Figura 7. Ubicación del ventilador con relación a la estructura y el modelo (vista superior)
Fuente: Elaboración propia.

En la parte superior de la estructura de metal se instaló una balanza de resorte con el que se realizaron las mediciones de fuerza. Al centro de la cara superior e inferior se adaptaron soportes de aluminio para rodamientos en el cual se instaló un eje en que soporta el modelo de alabe de aerogenerador SAVONIUS y los PROTOTIPOS.

3.1.5. Tratamientos

El modelo cero (SAVONIUS CLASICO) y los modelos correspondientes a los prototipos A, B y C se evaluaron con la misma metodología para lograr determinar la relación velocidad de viento – rpm y velocidad de viento – gr fuerza.

3.1.5.1. Velocidad de viento – rpm

Cada modelo se evaluó con cada una de las 3 velocidades que el ventilador.

3.1.5.2. *Velocidad de viento – gr fuerza*

El giro del modelo se dividió cada 15° (Figura 35), en cada posición se evaluó con cada una de las 3 velocidades del ventilador (Tabla 11-14)

3.1.6. Características del área experimental

Laboratorio: con buena iluminación y sin corrientes de aire para no interferir con el proceso de evaluación del prototipo.

Condiciones atmosféricas: temperatura ambiente, humedad y presión atmosférica no son manipuladas, pero son las características propias de la costa central y a 90 msnm.

3.1.7. Variable para evaluar

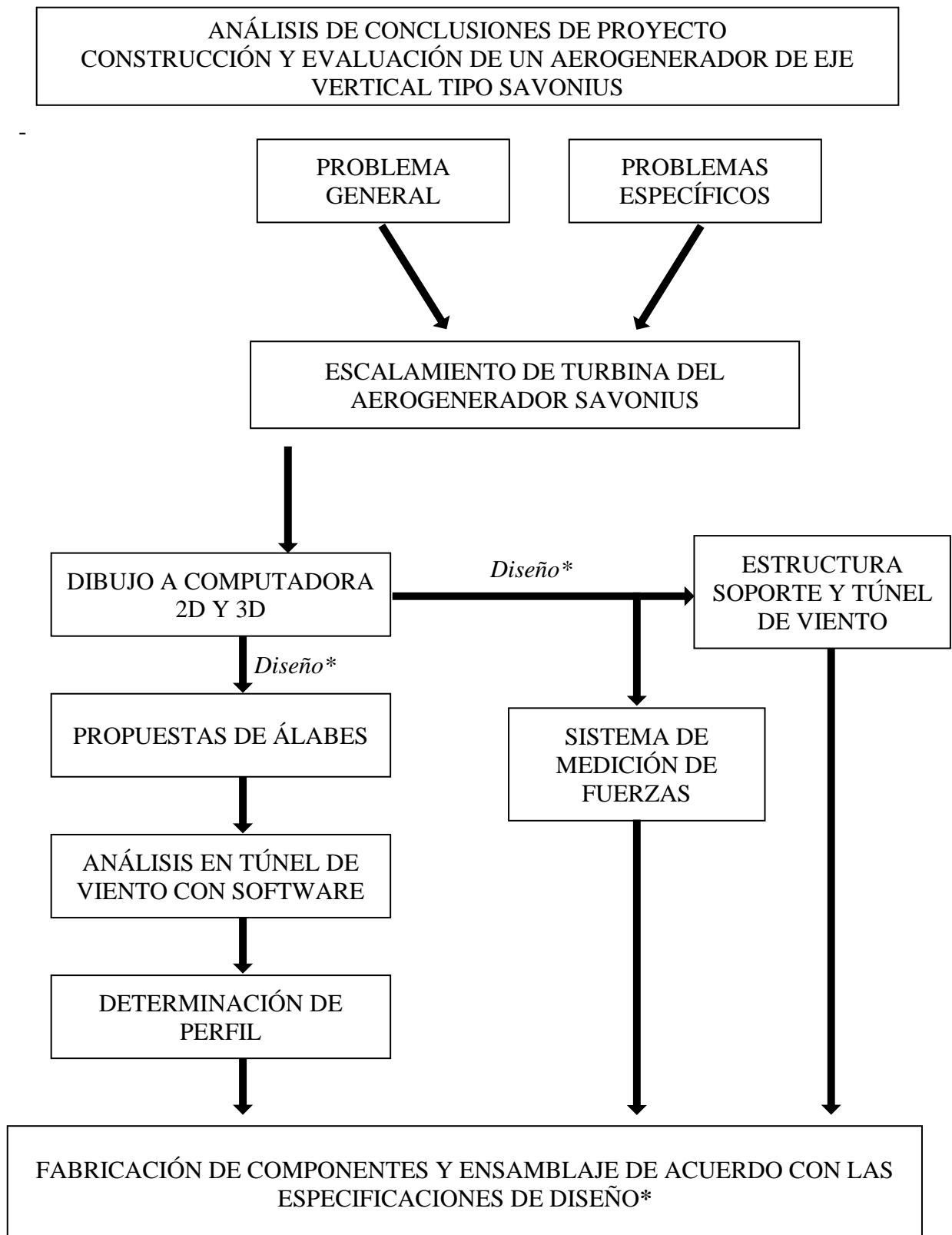
3.1.7.1. *Variables independientes*

- Velocidades de viento
- Modelos distintos
- Posiciones de las álabes en relación a la dirección del viento

3.1.7.2. *Variables dependientes*

- Datos de los instrumentos de medición (gr- fuerza, rpm, velocidad de viento)

3.1.8. Conducción del experimento



*Diseño: determinación de dimensiones, perfil, materiales a usar y método de fabricación.

Figura 8. Diagrama de flujo del proceso de diseño de los modelos, estructura y sistema de medición de fuerzas

Fuente: Elaboración propia.

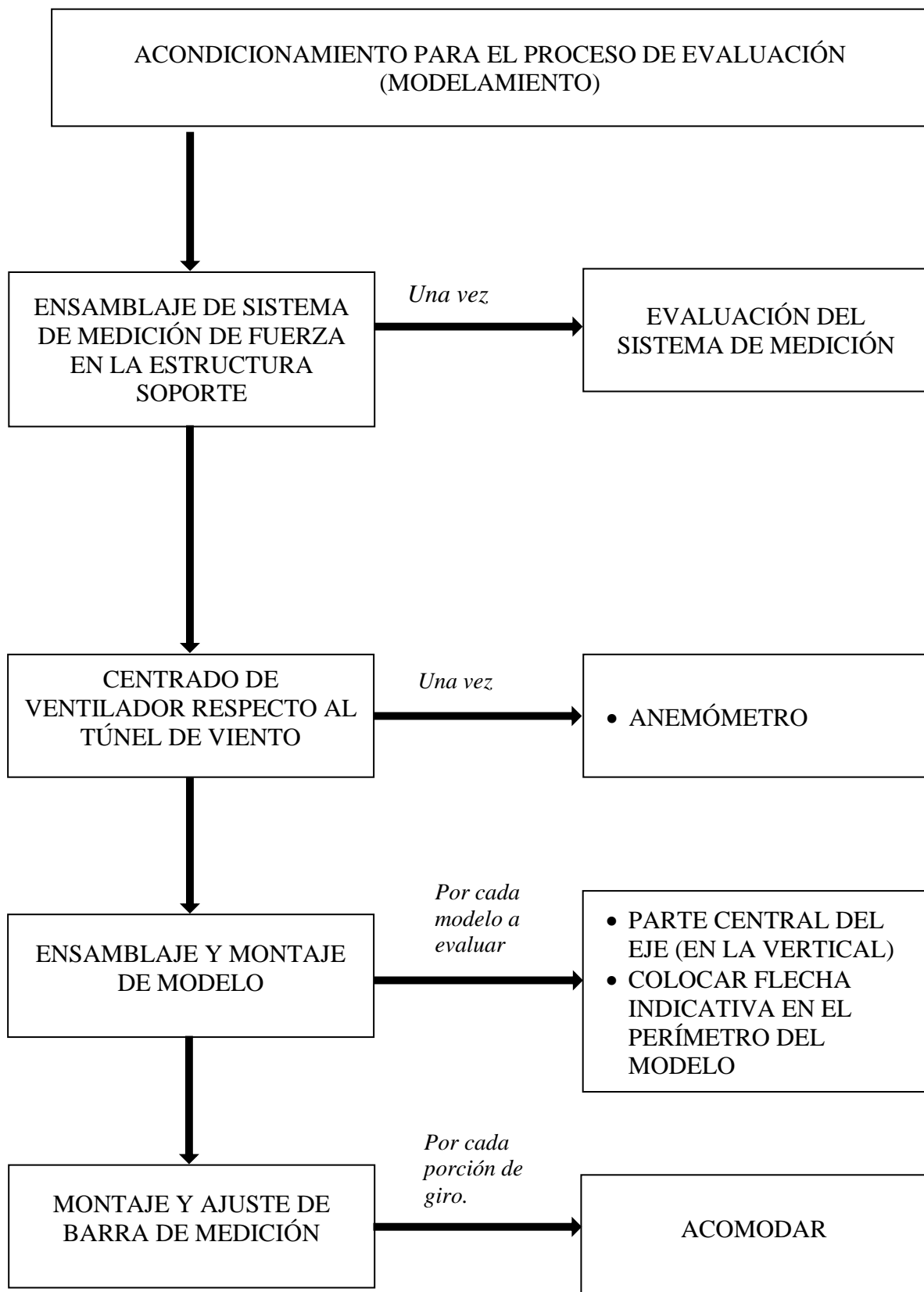


Figura 9. Diagrama de flujo del proceso de ensamblaje y montaje de modelos, estructura y sistema de medición de fuerzas

Fuente: Elaboración propia.

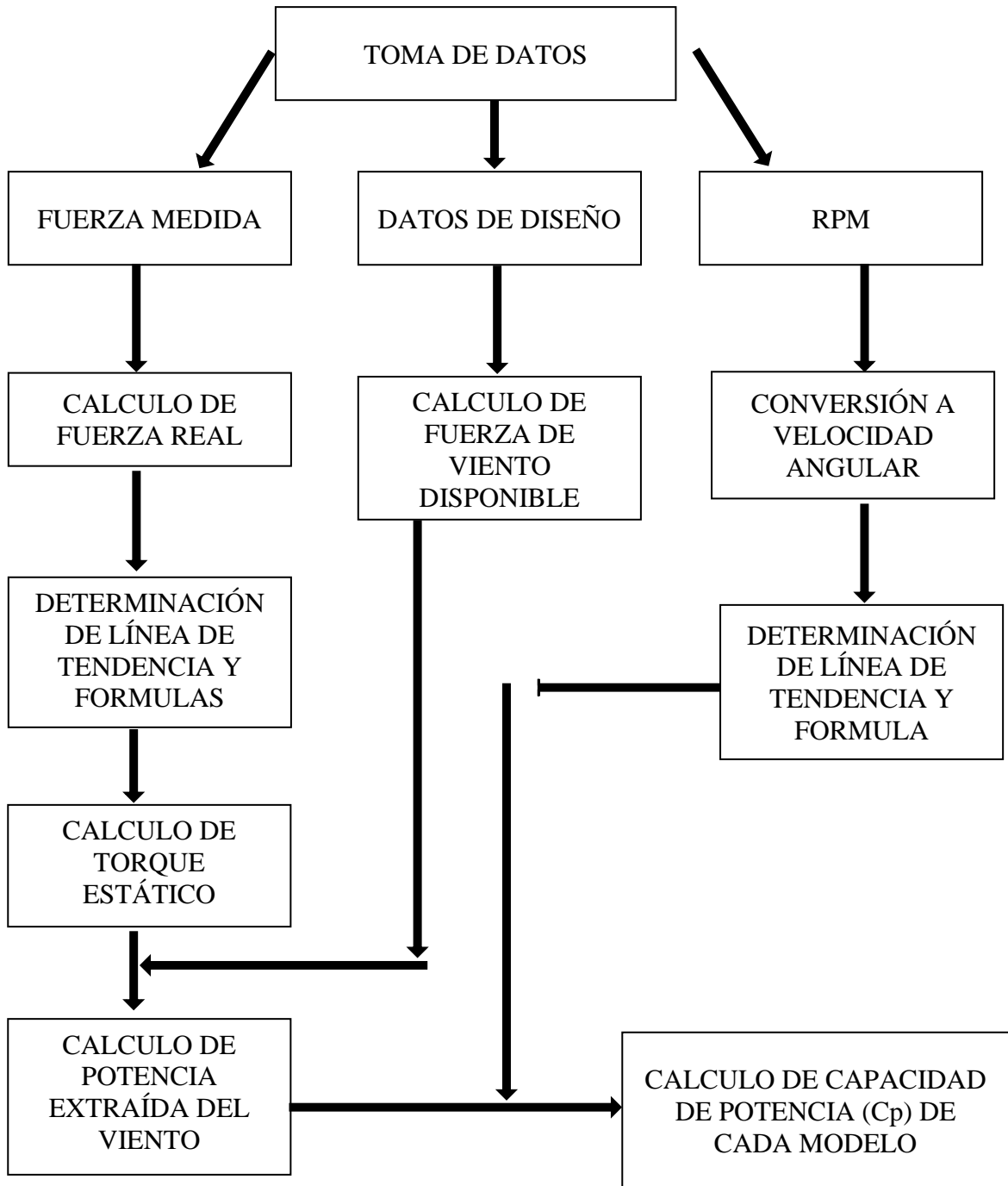


Figura 10. Diagrama de flujo para el cálculo de capacidad de potencia de los modelos
Fuente: Elaboración propia.

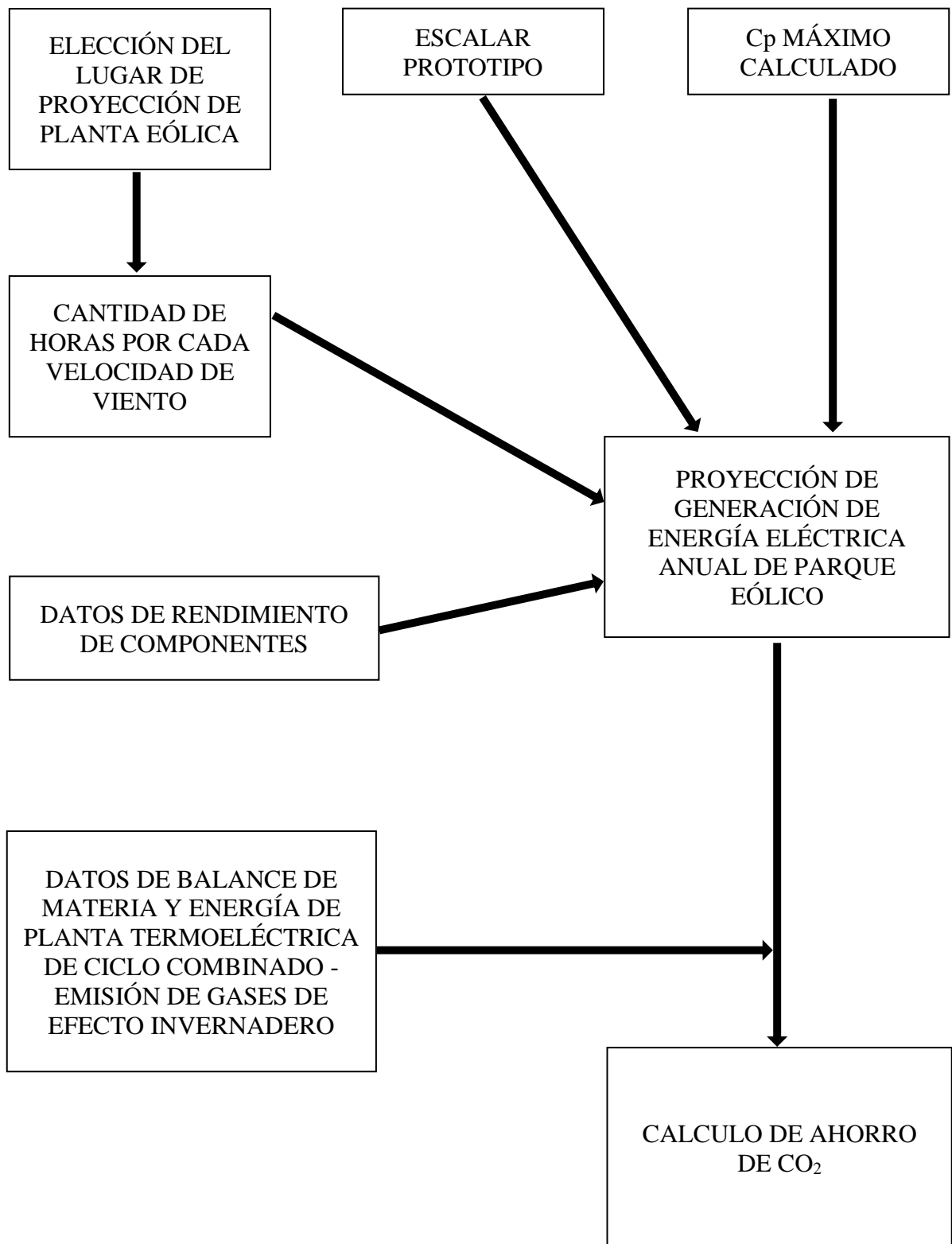


Figura 11. Diagrama de flujo para el cálculo de ahorro de CO₂.
Fuente: Elaboración propia.

3.2. Población y muestra

3.2.1. Población

Un modelo de turbina tipo SAVONIUS (clásico) de dos etapas (en el mismo eje de giro), 0.2 metros de diámetro, 0.15 metros de altura (cada etapa) y 0.065 metros de traslape.

El modelo de PROTOTIPO tipo SAVONIUS modificado de una etapa, 4 álabes, 0.24 metros de diámetro, 0.18 metros de altura y una separación entre álabes de 0.07 metros en la línea de eje. Los álabes del prototipo tienen un punto de giro lo que permitió evaluar el prototipo de alabe en 3 configuraciones distintas (Prototipo – A, B y C)

3.2.2. Muestra

La muestra está determinada por el número de mediciones que se realizaron (300) que resultó de multiplicar el número de posiciones a evaluar (24)(360° /15°), las velocidades de viento con las que está configurado el ventilador (3) y los modelos a evaluar (4), además de las RPM de cada modelo y las distintas velocidades de viento (12).

3.3. Técnicas de recolección de datos

3.3.1. Técnicas de recolección de datos

3.3.1.1. *Análisis de contenido*

Mediante el análisis documental y sus respectivos instrumentos se revisó las fuentes bibliográficas, publicaciones especializadas, principales repositorios y revistas nacionales e internacionales directamente relacionados con el tema de investigación. (Carrasco, 2015)

Se realizó la recopilación y análisis de información necesaria para diseñar, contruir, evaluar y aplicar el prototipo de álabe necesario.

3.3.1.2. *Observación*

La técnica de la observación es un proceso intencional de captación de las características, cualidades propiedades de los objetos y sujetos de la realidad, a través de nuestros sentidos o con la ayuda de poderosos instrumentos que amplían su limitada capacidad. En términos más específicos, la técnica de

observación se define como el proceso sistemático de obtención, recopilación y registro de datos empíricos de un objeto, un suceso, un acontecimiento o conducta humana con el proceso de procesarlo y convertirlo en información. (Carrasco, 2015)

Se aplicó la técnica de observación directa con el uso de instrumentos de medición (balanza de resorte, anemómetro, tacómetro).

3.4. Técnicas para el procesamiento de la información

Por la naturaleza del trabajo de investigación las técnicas para el procesamiento de datos fueron las siguientes:

Tabla 8.
Técnicas para procesamiento de la información.

TÉCNICA DE PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN	JUSTIFICACIÓN
Observación directa	Diseño del perfil de álabe y el sistema de medición de torque estático.
Regresión lineal simple	Para hallar fórmulas que representen las mediciones obtenidas en la etapa de evaluación (EXCEL)
Modelamiento matemático	Cálculo del torque estático, escalar el modelo con mayor C_p , proyectar la posible generación de energía eléctrica y el ahorro de CO_2 .

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS

4.1. Determinación de ecuación que relaciona el peso real y velocidad de viento.

Se utilizó el principio de la palanca para hallar el torque en el punto más extremo de la turbina.

Tabla 9

Dimensiones de rotor para cálculo de torque de turbina.

	SAVONIUS CLÁSICO	PROTOTIPO - A	PROTOTIPO - B	PROTOTIPO - C
Diámetro del rotor (\emptyset) m	0,206	0,240	0,240	0,240
Longitud de barra de medición (B) m	0,200	0,200	0,200	0,200

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10.

Velocidades de viento del ventilador.

# de velocidad	Velocidad de viento (m/s)
I	2,90
II	3,9
III	4,8

Fuente: Elaboración propia.

$$\text{Fuerza real (g)} \times \emptyset/2 \text{ (m)} = \text{Fuerza medida (g)} \times B \text{ (m)}$$

$$\text{Fuerza captada del viento (g)} = \text{Fuerza real (g)} = \frac{\text{Peso medido (g)} \times \text{Barra (m)}}{\emptyset/2 \text{ (m)}}$$

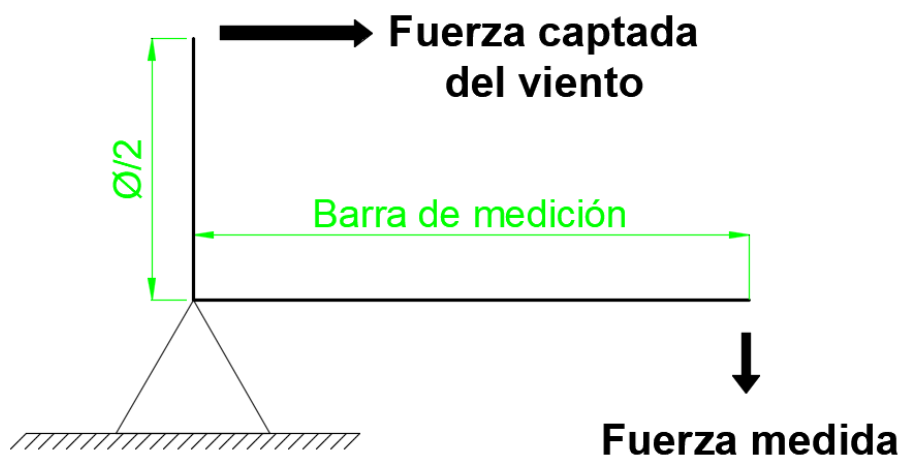


Figura 12. Diagrama de fuerza para medición y cálculo de torque.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11.

Fuerza medida y fuerza real en cada posición de medición - SAVONIUS clásico.

	0°		15°		30°		45°		60°		75°		
V _v (m/s)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	
I	2,90	3	5,83	3	5,83	4	7,77	5	9,71	3	5,83	2	3,88
II	3,90	5	9,71	5	9,71	7	13,59	9	17,48	5	9,71	5	9,71
III	4,80	9	17,48	11	21,36	12	23,30	14	27,18	10	19,42	9	17,48
	90°		105°		120°		135°		150°		165°		
V _v (m/s)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	
I	2,90	4	7,77	5	9,71	5	9,71	3	5,83	3	5,83	1	1,94
II	3,90	7	13,59	9	17,48	9	17,48	5	9,71	5	9,71	4	7,77
III	4,80	13	25,24	17	33,01	17	33,01	12	23,30	10	19,42	7	13,59
	180°		195°		210°		225°		240°		255°		
V _v (m/s)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	
I	2,90	3	5,83	2	3,88	4	7,77	4	7,77	2	3,88	2	3,88
II	3,90	6	11,65	5	9,71	8	15,53	9	17,48	5	9,71	5	9,71
III	4,80	10	19,42	12	23,30	12	23,30	15	29,13	11	21,36	9	17,48
	270°		285°		300°		315°		330°		345°		
V _v (m/s)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	
I	2,90	4	7,77	4	7,77	6	11,65	2	3,88	3	5,83	2	3,88
II	3,90	8	15,53	8	15,53	10	19,42	6	11,65	6	11,65	5	9,71
III	4,80	12	23,30	16	31,07	17	33,01	11	21,36	10	19,42	9	17,48

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12.

Fuerza medida y fuerza real en cada posición de medición - PROTOTIPO A.

		0°		15°		30°		45°		60°		75°	
V _v (m/s)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	
I	2.50	3	5,00	3	5,00	3	5,00	4	6,67	3	5,00	4	6,67
II	3.60	7	11,67	6	10,00	7	11,67	8	13,33	7	11,67	7	11,67
III	4.40	13	21,67	12	20,00	11	18,33	16	26,67	13	21,67	11	18,33
		90°		105°		120°		135°		150°		165°	
V _v (m/s)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	
I	2.50	3	5,00	4	6,67	3	5,00	3	5,00	3	5,00	3	5,00
II	3.60	6	10,00	7	11,67	6	10,00	7	11,67	7	11,67	5	8,33
III	4.40	11	18,33	12	20,00	11	18,33	15	25,00	13	21,67	9	15,00
		180°		195°		210°		225°		240°		255°	
V _v (m/s)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	
I	2.50	3	5,00	2	3,33	4	6,67	5	8,33	4	6,67	3	5,00
II	3.60	7	11,67	7	11,67	7	11,67	9	15,00	8	13,33	6	10,00
III	4.40	12	20,00	12	20,00	15	25,00	18	30,00	14	23,33	11	18,33
		270°		285°		300°		315°		330°		345°	
V _v (m/s)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	
I	2.50	4	6,67	5	8,33	4	6,67	5	8,33	4	6,67	5	8,33
II	3.60	7	11,67	8	13,33	8	13,33	10	16,67	9	15,00	9	15,00
III	4.40	13	21,67	14	23,33	15	25,00	19	31,67	15	25,00	14	23,33

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13.

Fuerza medida y fuerza real en cada posición de medición - PROTOTIPO B.

	0°		15°		30°		45°		60°		75°		
V _v (m/s)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	
I	2,90	2	3,33	4	6,67	6	10,00	3	5,00	2	3,33	1	1,67
II	3,90	5	8,33	8	13,33	9	15,00	7	11,67	2	3,33	2	3,33
III	4,80	10	16,67	14	23,33	16	26,67	10	16,67	6	10,00	4	6,67
	90°		105°		120°		135°		150°		165°		
V _v (m/s)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	
I	2,90	2	3,33	5	8,33	5	8,33	2	3,33	1	1,67	0	0,00
II	3,90	4	6,67	7	11,67	10	16,67	5	8,33	2	3,33	1	1,67
III	4,80	12	20,00	13	21,67	16	26,67	11	18,33	3	5,00	2	3,33
	180°		195°		210°		225°		240°		255°		
V _v (m/s)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	
I	2,90	3	5,00	5	8,33	5	8,33	4	6,67	1	1,67	0	0,00
II	3,90	5	8,33	9	15,00	10	16,67	8	13,33	3	5,00	2	3,33
III	4,80	10	16,67	15	25,00	17	28,33	11	18,33	5	8,33	4	6,67
	270°		285°		300°		315°		330°		345°		
V _v (m/s)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	
I	2,90	3	5,00	5	8,33	6	10,00	4	6,67	1	1,67	0	0,00
II	3,90	6	10,00	8	13,33	10	16,67	7	11,67	2	3,33	1	1,67
III	4,80	10	16,67	15	25,00	18	30,00	12	20,00	4	6,67	3	5,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14.

Fuerza medida y fuerza real en cada posición de medición - PROTOTIPO C.

	0°		15°		30°		45°		60°		75°		
V _v (m/s)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	
I	2,90	9	15,00	8	13,33	5	8,33	7	11,67	7	11,67	6	10,00
II	3,90	15	25,00	15	25,00	9	15,00	13	21,67	14	23,33	12	20,00
III	4,80	23	38,33	27	45,00	18	30,00	23	38,33	24	40,00	20	33,33
	90°		105°		120°		135°		150°		165°		
V _v (m/s)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	
I	2,90	8	13,33	9	15,00	6	10,00	7	11,67	8	13,33	6	10,00
II	3,90	13	21,67	15	25,00	9	15,00	14	23,33	14	23,33	13	21,67
III	4,80	22	36,67	25	41,67	19	31,67	24	40,00	24	40,00	21	35,00
	180°		195°		210°		225°		240°		255°		
V _v (m/s)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	
I	2,90	9	15,00	9	15,00	5	8,33	8	13,33	8	13,33	7	11,67
II	3,90	13	21,67	14	23,33	9	15,00	14	23,33	12	20,00	13	21,67
III	4,80	23	38,33	26	43,33	20	33,33	25	41,67	23	38,33	21	35,00
	270°		285°		300°		315°		330°		345°		
V _v (m/s)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	
I	2,90	9	15,00	9	15,00	5	8,33	8	13,33	9	15,00	7	11,67
II	3,90	13	21,67	15	25,00	10	16,67	12	20,00	15	25,00	13	21,67
III	4,80	23	38,33	27	45,00	21	35,00	25	41,67	24	40,00	22	36,67

Fuente: Elaboración propia.

Se utilizaron los datos de las columnas fuerza real de las Tabla 11-14. Ubicando los puntos en un plano cartesiano y graficándolas se obtuvo líneas de -tendencia muy dispersas y pendiente semejante. Para los siguientes cálculos es necesaria una línea de tendencia (y fórmula) que represente el torque que corresponda a cada modelo evaluado.

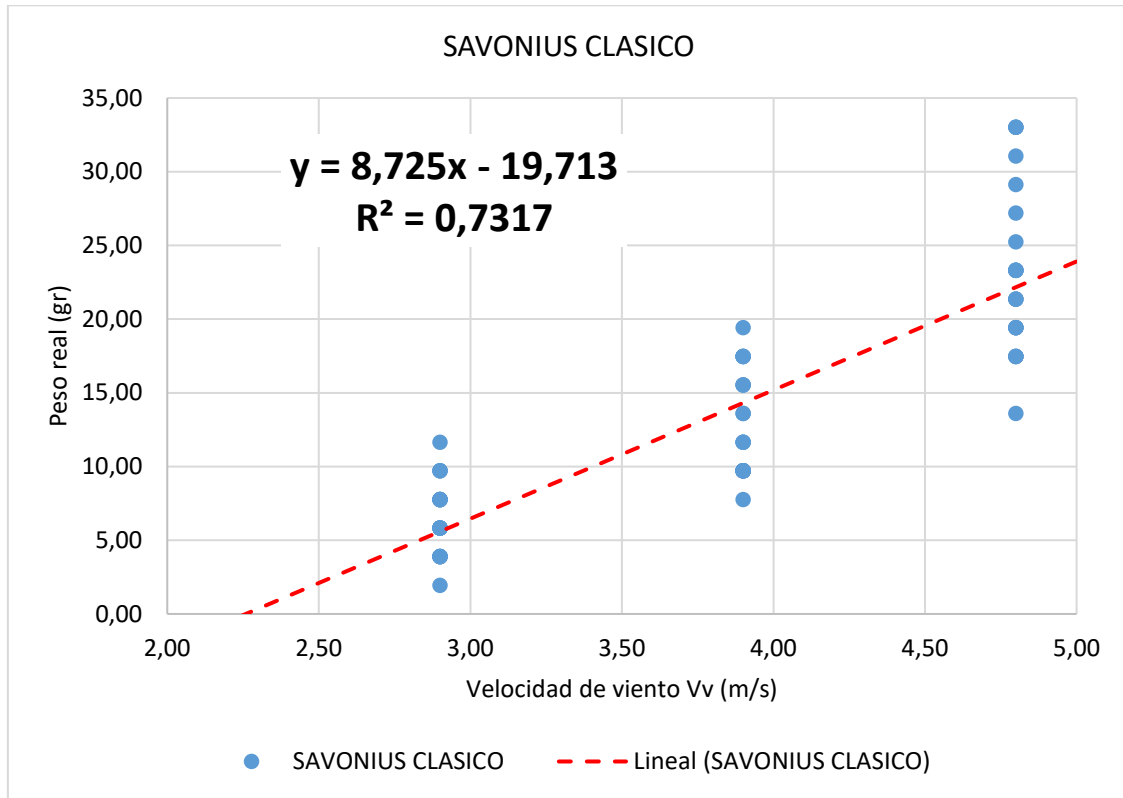


Figura 13. Línea de tendencia y fórmula, de modelo SAVONIUS clásico.
Elaboración propia.

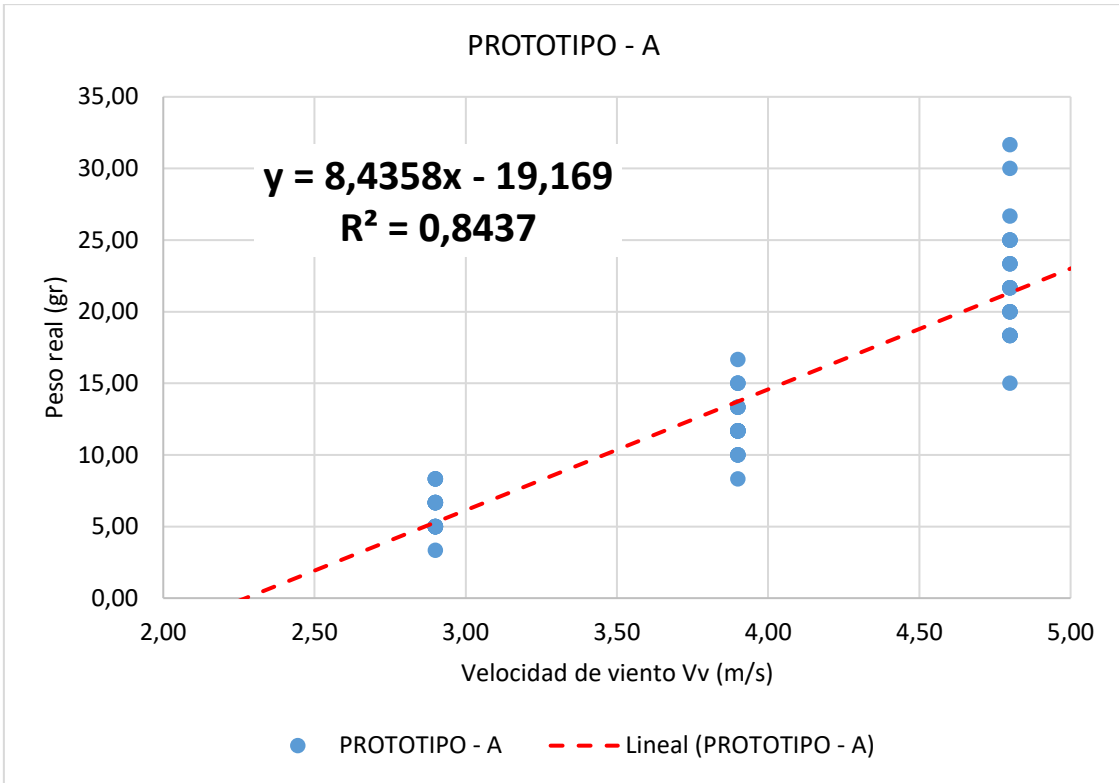


Figura 14. Línea de tendencia y fórmula, fuerza de álabes de modelo PROTOTIPO A
Elaboración propia.

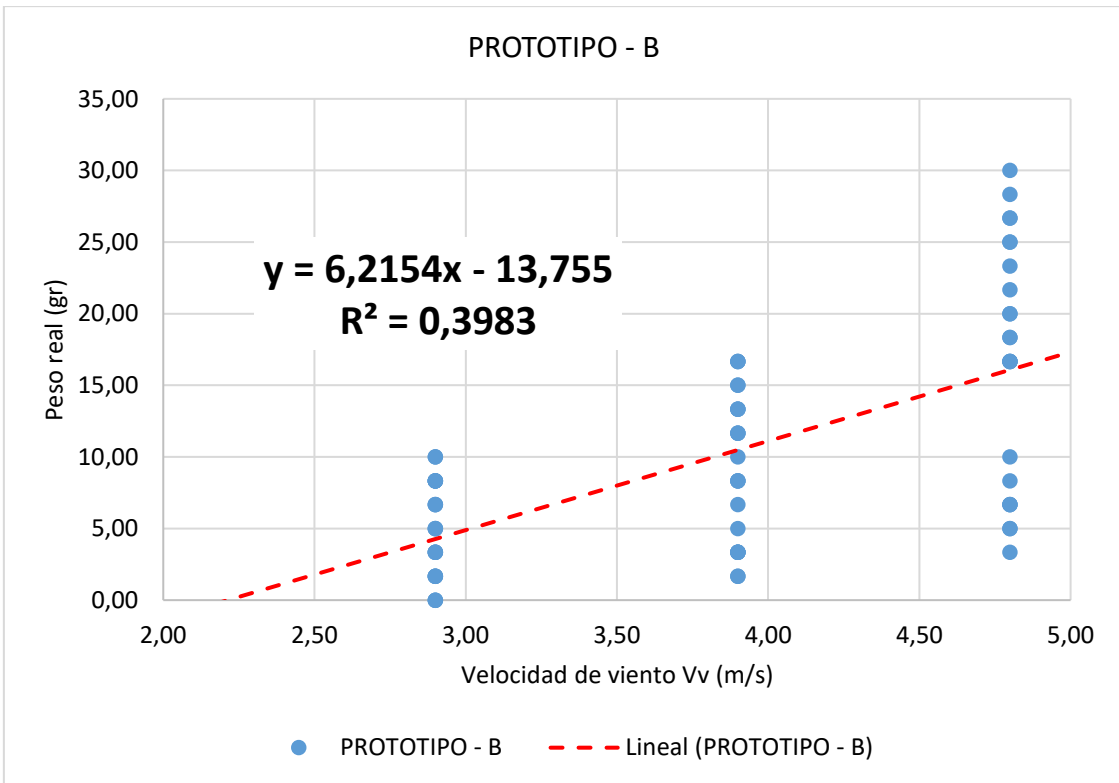


Figura 15. Línea de tendencia y fórmula, fuerza de álabes de modelo PROTOTIPO B
Elaboración propia.

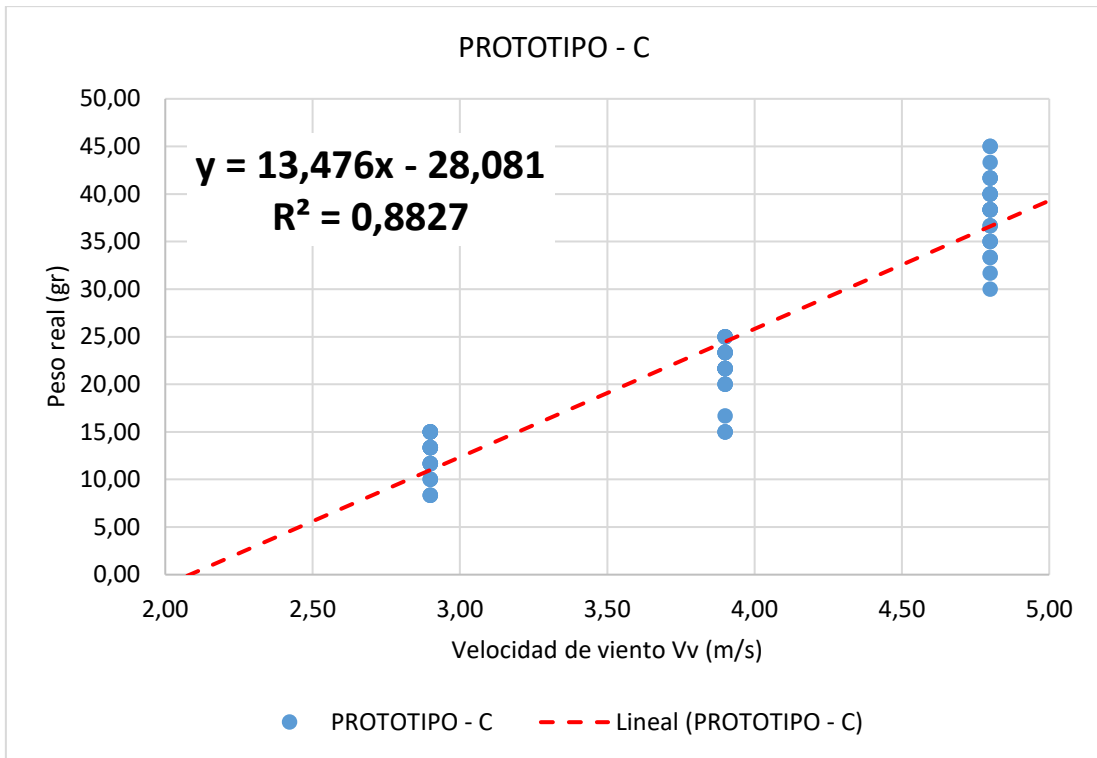


Figura 16. Línea de tendencia y fórmula, fuerza de álabes de modelo PROTOTIPO C
Elaboración propia.

Tabla 15.

Fórmulas y R2 de los modelos evaluados en fuerza real.

	Fórmula	R ²
SAVONIUS CLÁSICO	$y = 8,725x - 19,713$	0,7317
PROTOTIPO - A	$y = 8,4358x - 19,169$	0,8437
PROTOTIPO - B	$y = 6,2154x - 13,755$	0,3983
PROTOTIPO - C	$y = 13,476x - 28,081$	0,8827

Fuente: Elaboración propia.

4.2. Cálculo de torque (N/m) vs Velocidad de viento.

Las líneas de tendencia y las fórmulas generadas (Tabla 15) se utilizó para graficar el torque a distintas velocidades de viento (Tabla 16). Tener en cuenta que las fuerzas actúan en el plano horizontal donde la aceleración de la gravedad no tiene injerencia.

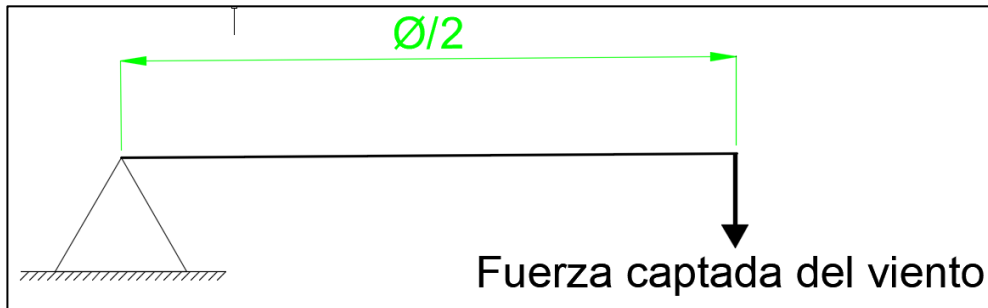


Figura 17. Diagrama de fuerza

Fuente: Elaboración propia.

$$Fuerza\ real\ (g - fuerza) = fuerza\ del\ viento\ captada\ (g - fuerza)$$

$$1000\ g - fuerza = 1\ kg - fuerza = 9.8\ Newton\ (N)$$

$$Torque\ (Nm) = \frac{\varnothing\ de\ modelo}{2} (m) \times fuerza\ real\ (g - fuerza) \times \frac{1\ kg - fuerza}{1000\ g - fuerza} \times \frac{9,8\ N}{1\ kg - fuerza}$$

Tabla 16.
Torque (N/m) de los modelos evaluados

Velocidad de viento (m/s)	Torque (Nm)			
	SAVONIUS CLÁSICO	PROTOTIPO - A	PROTOTIPO - B	PROTOTIPO - C
2,5	0,002	0,002	0,002	0,007
3	0,007	0,007	0,006	0,015
3,5	0,011	0,012	0,009	0,022
4	0,015	0,017	0,013	0,030
4,5	0,020	0,022	0,017	0,038
5	0,024	0,027	0,020	0,046
5,5	0,029	0,032	0,024	0,054
6	0,033	0,037	0,028	0,062
6,5	0,037	0,042	0,031	0,070
7	0,042	0,047	0,035	0,078
7,5	0,046	0,052	0,039	0,086
8	0,051	0,057	0,042	0,094
8,5	0,055	0,062	0,046	0,102
9	0,059	0,067	0,050	0,110
9,5	0,064	0,072	0,053	0,118
10	0,068	0,077	0,057	0,125
10,5	0,073	0,082	0,061	0,133
11	0,077	0,087	0,064	0,141
11,5	0,081	0,092	0,068	0,149
12	0,086	0,097	0,072	0,157
12,5	0,090	0,101	0,075	0,165
13	0,095	0,106	0,079	0,173
13,5	0,099	0,111	0,082	0,181
14	0,103	0,116	0,086	0,189
14,5	0,108	0,121	0,090	0,197
15	0,112	0,126	0,093	0,205
15,5	0,117	0,131	0,097	0,213
16	0,121	0,136	0,101	0,221

Fuente: Elaboración propia.

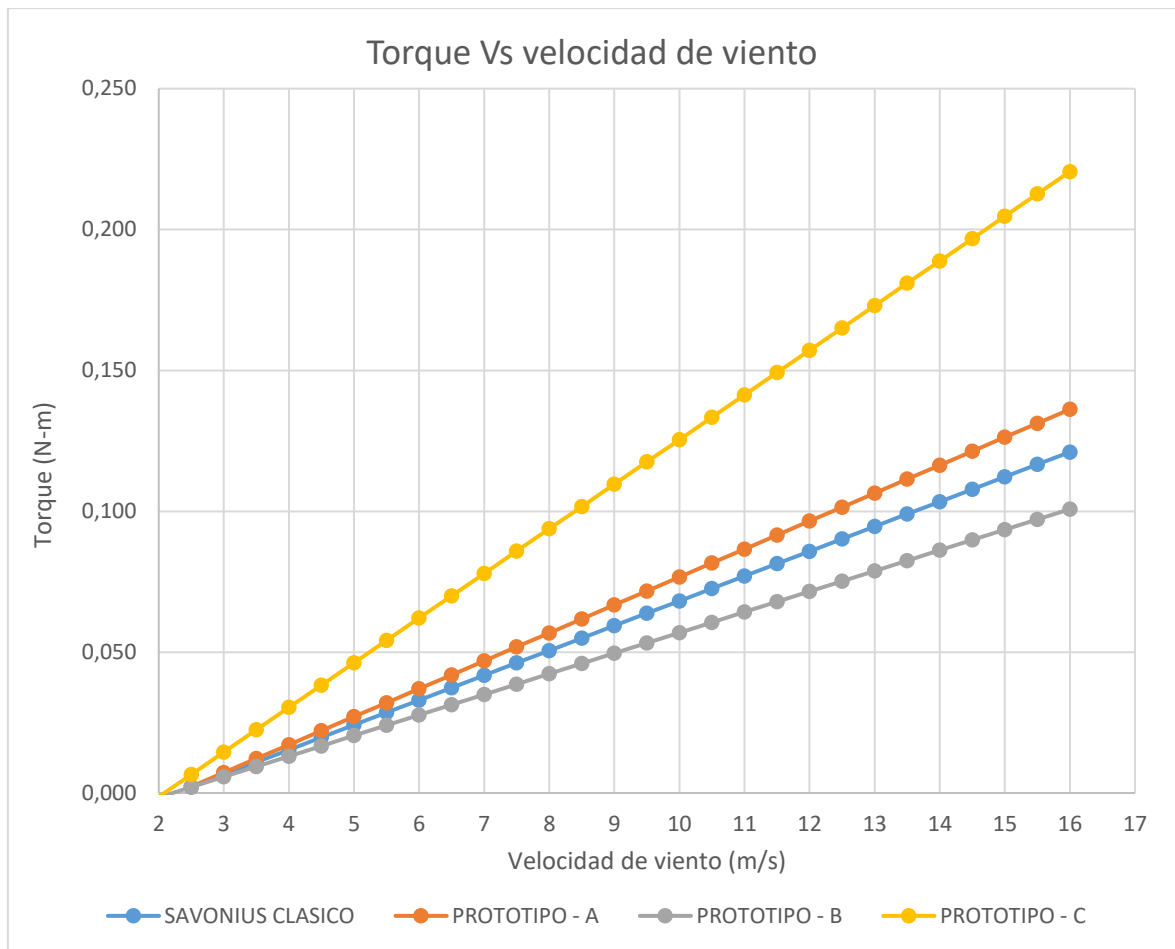


Figura 18. Gráfica de torque de los modelos evaluados.

Fuente: Elaboración propia.

4.3. Determinación de fórmula de velocidad angular (rad/s) Vs. Velocidad de viento m/s.

Tabla 17.

RPM y velocidad angular de los modelos evaluados

	Revoluciones por minuto (RPM)			
	SAVONIUS CLÁSICO	PROTOTIPO A	PROTOTIPO B	PROTOTIPO C
I	115	102	69	118
II	196	169	117	186
III	285	260	192	262
	Velocidad angular			
	SAVONIUS CLÁSICO	PROTOTIPO A	PROTOTIPO B	PROTOTIPO C
I	12,04	10,68	7,23	12,36
II	20,53	17,70	12,25	19,48
III	29,85	27,23	20,11	27,44

Fuente: Elaboración propia.

$$\text{Velocidad angular} = \text{RPM} \times \frac{2 \times \pi \text{ rad}}{60 \text{ s}}$$

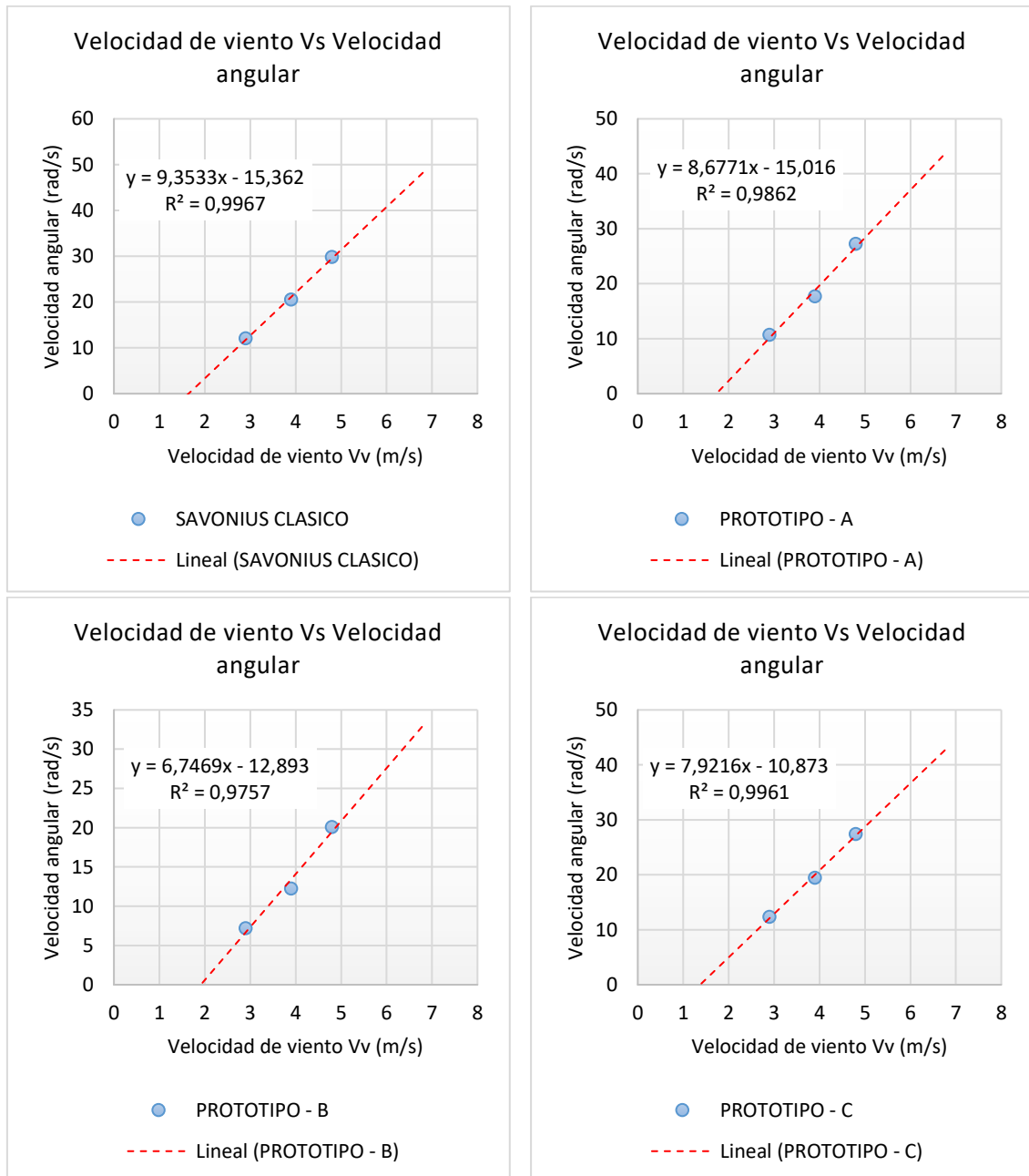


Figura 19. Velocidad de viento Vs. velocidad angular del modelo SAVONIUS clásico y los PROTOTIPOS
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 18.

Fórmulas y R2 de los modelos evaluados de velocidad angular.

	Fórmula	R ²
SAVONIUS CLÁSICO	$y = 9,3533x - 15362$	0,9967
PROTOTIPO - A	$y = 8,6771x - 15,016$	0,9862
PROTOTIPO - B	$y = 6,7469x - 12,893$	0,9757
PROTOTIPO - C	$y = 7,9216x - 10,873$	0,9961

Fuente: Elaboración propia.

4.4. Cálculo de Potencia de viento disponible (W)

$$Potencia\ de\ viento\ disponible\ (W_d) = \frac{\rho \left(\frac{kg}{m^3}\right) \times A\ (m^2) \times (Vv)^3 \left(\frac{m}{s}\right)}{2}$$

Tabla 19.

Dimensiones de rotor para cálculo de potencia de viento disponible (W)

	SAVONIUS CLÁSICO	PROTOTIPO A	PROTOTIPO B	PROTOTIPO C
Densidad de Aire (ρ) Kg/m3	1,126	1,126	1,126	1,126
Diámetro del rotor (Ø) m	0,206	0,240	0,240	0,240
Altura de álabes (A) m	0,100	0,185	0,185	0,185
Numero de etapas	2	1	1	1
Área de barrido de rotor m2	0,041	0,044	0,044	0,044

Fuente: Elaboración propia.

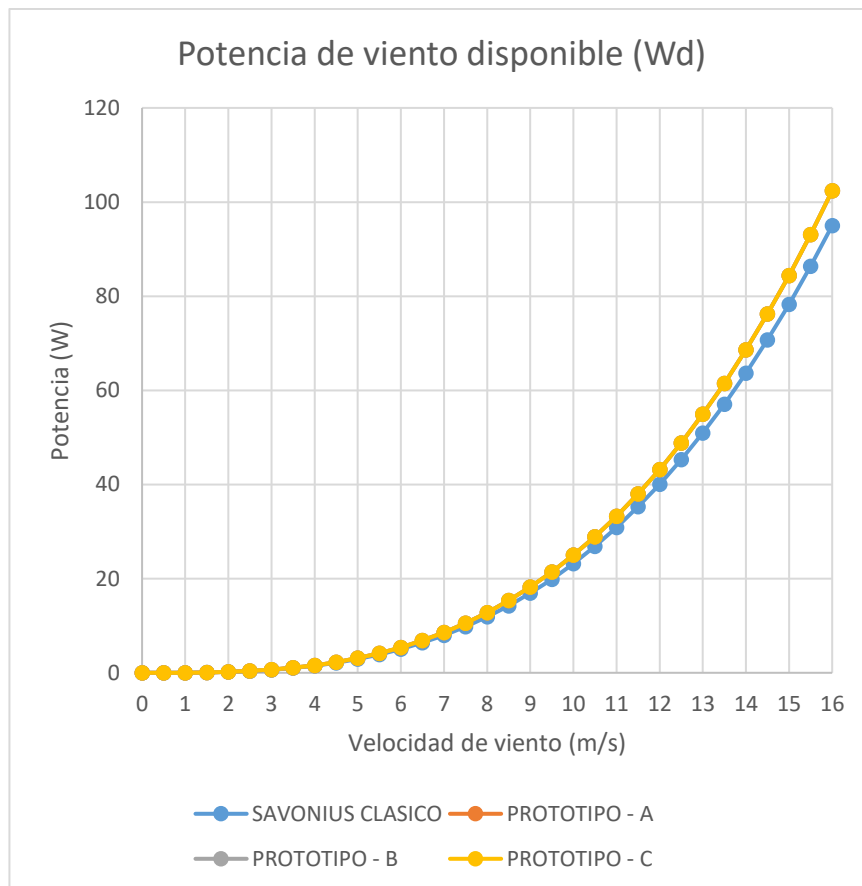


Figura 20. Gráfica de potencia de viento disponible (W) de los modelos evaluados.

Fuente: Elaboración propia.

La potencia de viento disponible (W_d) depende del área de la turbina, los modelos de los PROTOTIPOS A, B Y C (Figura 39) son de áreas iguales, por tal motivo las curvas se superponen.

Tabla 20.

Potencia de viento disponible (W_d) de los modelos evaluados.

Velocidad de viento (m/s)	Potencia de viento disponible (W_d)			
	SAVONIUS CLÁSICO	PROTOTIPO A	PROTOTIPO B	PROTOTIPO C
0	0,000	0,000	0,000	0,000
0,5	0,003	0,003	0,003	0,003
1	0,023	0,025	0,025	0,025
1,5	0,078	0,084	0,084	0,084
2	0,186	0,200	0,200	0,200
2,5	0,362	0,391	0,391	0,391
3	0,626	0,675	0,675	0,675
3,5	0,995	1,072	1,072	1,072
4	1,485	1,600	1,600	1,600
4,5	2,114	2,278	2,278	2,278
5	2,899	3,125	3,125	3,125
5,5	3,859	4,159	4,159	4,159
6	5,010	5,399	5,399	5,399
6,5	6,370	6,865	6,865	6,865
7	7,956	8,574	8,574	8,574
7,5	9,786	10,546	10,546	10,546
8	11,876	12,799	12,799	12,799
8,5	14,245	15,351	15,351	15,351
9	16,910	18,223	18,223	18,223
9,5	19,887	21,432	21,432	21,432
10	23,196	24,997	24,997	24,997
10,5	26,852	28,937	28,937	28,937
11	30,873	33,271	33,271	33,271
11,5	35,278	38,018	38,018	38,018
12	40,082	43,195	43,195	43,195
12,5	45,304	48,823	48,823	48,823
13	50,961	54,919	54,919	54,919
13,5	57,070	61,502	61,502	61,502
14	63,649	68,592	68,592	68,592
14,5	70,715	76,207	76,207	76,207
15	78,285	84,366	84,366	84,366
15,5	86,378	93,086	93,086	93,086
16	95,009	102,389	102,389	102,389

Fuente: Elaboración propia.

4.5. Cálculo de la potencia extraída (W_e)

Se desarrolla las fórmulas de la Tabla 18 de velocidad angular

$$Potencia\ extraida\ (W_e) = Velocidad\ angular\ \left(\frac{rad}{s}\right) \times Torque\ (Nm)$$

Tabla 21.

Potencia de viento extraída (W_e) de los modelos evaluados

Velocidad de viento (m/s)	Potencia de viento extraída (W)			
	SAVONIUS CLÁSICO	PROTOTIPO - A	PROTOTIPO - B	PROTOTIPO - C
0	0,31	0,34	0,21	0,36
0,5	0,17	0,19	0,12	0,17
1	0,07	0,08	0,05	0,05
1,5	0,01	0,02	0,01	-0,01
2	-0,01	-0,01	0,00	-0,01
2,5	0,02	0,02	0,01	0,06
3	0,08	0,08	0,04	0,19
3,5	0,19	0,19	0,10	0,38
4	0,34	0,34	0,18	0,63
4,5	0,53	0,53	0,29	0,95
5	0,76	0,77	0,42	1,33
5,5	1,03	1,05	0,58	1,77
6	1,34	1,37	0,76	2,28
6,5	1,70	1,74	0,97	2,84
7	2,09	2,14	1,20	3,47
7,5	2,53	2,60	1,46	4,17
8	3,01	3,09	1,74	4,92
8,5	3,53	3,63	2,04	5,74
9	4,09	4,21	2,37	6,62
9,5	4,69	4,83	2,73	7,57
10	5,33	5,50	3,11	8,57
10,5	6,01	6,21	3,51	9,64
11	6,74	6,96	3,94	10,78
11,5	7,50	7,76	4,39	11,97
12	8,31	8,60	4,87	13,23
12,5	9,16	9,48	5,37	14,55
13	10,05	10,41	5,90	15,93
13,5	10,98	11,38	6,45	17,38
14	11,95	12,39	7,03	18,89
14,5	12,96	13,44	7,63	20,46
15	14,02	14,54	8,25	22,10
15,5	15,11	15,68	8,90	23,79
16	16,25	16,86	9,58	25,55

Fuente: Elaboración propia.

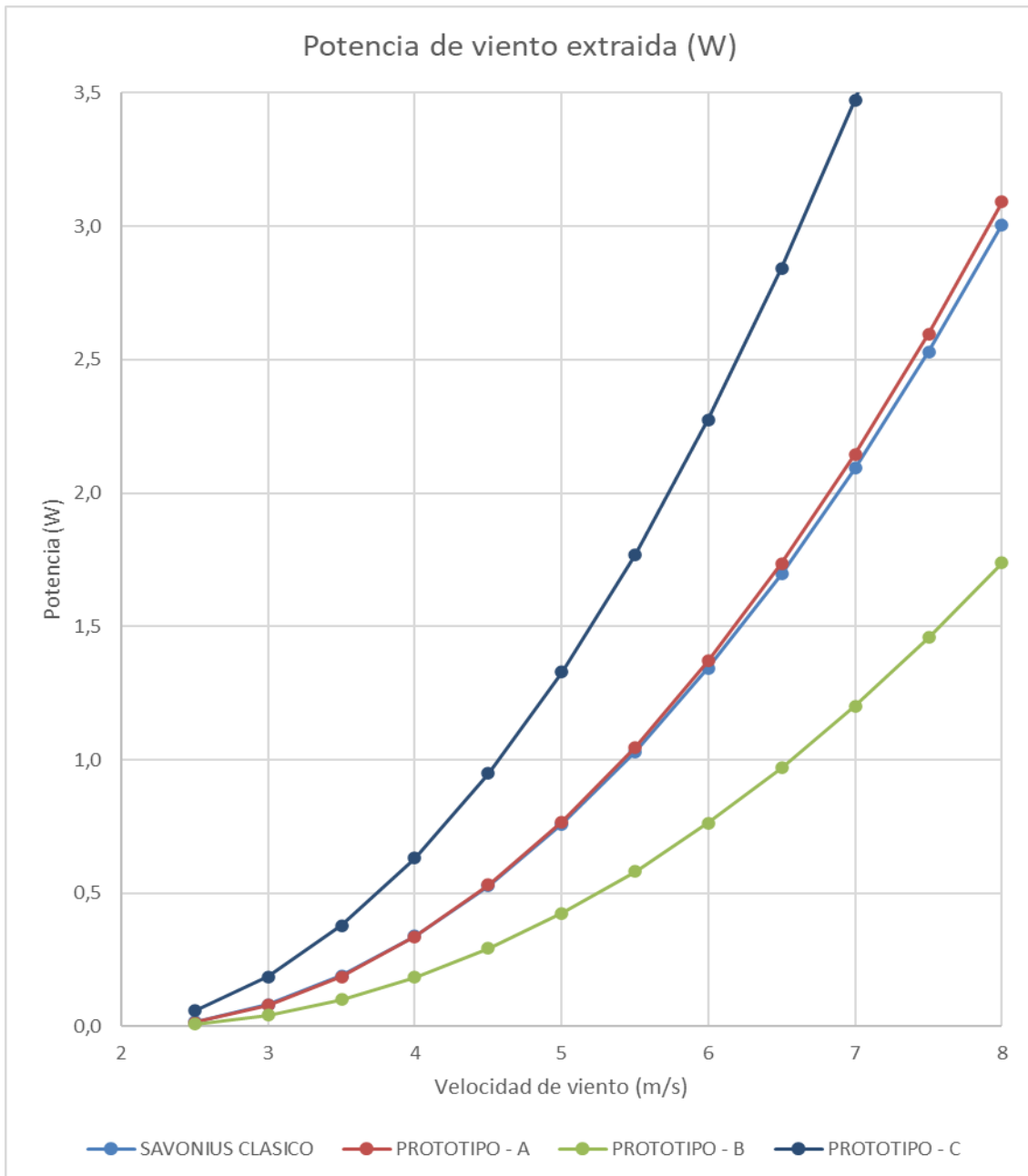


Figura 21. Gráfica de potencia de viento extraída (W_e) de los modelos evaluados.
Fuente: Elaboración propia.

4.6. Cálculo de capacidad de potencia (C_p).

Con los datos de potencia de viento disponible (Tabla 20) y de viento extraído (Tabla 21) se calculó la capacidad de potencia de cada modelo simulado.

$$\text{Ratio típico de velocidad} = \frac{\text{velocidad angular } (\omega) * \frac{\text{diámetro del rotor (m)}}{2}}{\text{Potencia disponible (Wd)}}$$

$$\text{Capacidad de potencia}(C_p) = \frac{\text{Potencia extraída (W}_e\text{)}}{\text{Potencia disponible (W}_d\text{)}}$$

Tabla 22.
 Capacidad de potencia (C_p) de los modelos evaluados.

Velocidad de viento (m/s)	Capacidad de potencia (C_p)			
	SAVONIUS CLÁSICO	PROTOTIPO - A	PROTOTIPO - B	PROTOTIPO - C
2,5	0,05	0,04	0,02	0,15
3	0,13	0,12	0,06	0,28
3,5	0,19	0,17	0,09	0,35
4	0,23	0,21	0,12	0,40
4,5	0,25	0,23	0,13	0,42
5	0,26	0,25	0,14	0,43
5,5	0,27	0,25	0,14	0,43
6	0,27	0,25	0,14	0,42
6,5	0,27	0,25	0,14	0,41
7	0,26	0,25	0,14	0,41
7,5	0,26	0,25	0,14	0,40
8	0,25	0,24	0,14	0,38
8,5	0,25	0,24	0,13	0,37
9	0,24	0,23	0,13	0,36
9,5	0,24	0,23	0,13	0,35
10	0,23	0,22	0,12	0,34
10,5	0,22	0,21	0,12	0,33
11	0,22	0,21	0,12	0,32
11,5	0,21	0,20	0,12	0,31
12	0,21	0,20	0,11	0,31
12,5	0,20	0,19	0,11	0,30
13	0,20	0,19	0,11	0,29
13,5	0,19	0,18	0,10	0,28
14	0,19	0,18	0,10	0,28
14,5	0,18	0,18	0,10	0,27
15	0,18	0,17	0,10	0,26
15,5	0,17	0,17	0,10	0,26
16	0,17	0,16	0,09	0,25

Fuente: Elaboración propia.

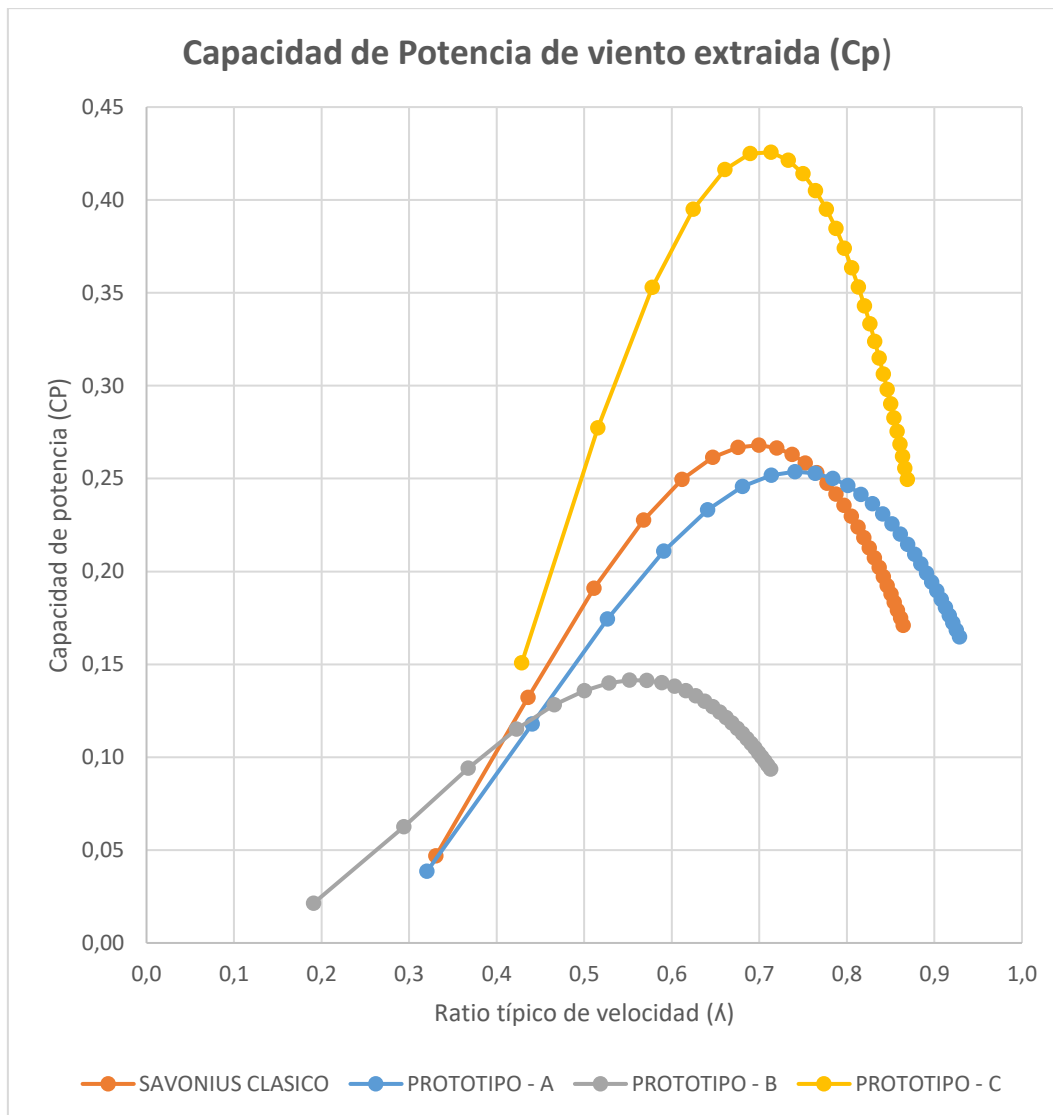


Figura 22. Gráfica de capacidad de potencia (Cp) de los modelos evaluados.

Nota: Se graficó los datos positivos de Ratio típico de velocidad.

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 23 sistematiza los resultados de la Tabla 22, además de indicar el porcentaje de incremento de la eficiencia de la captación de la energía eólica.

Tabla 23.

Comparación de Capacidad de potencia (Cp) de los modelos evaluados

	Cp máximo			
	SAVONIUS CLÁSICO	PROTOTIPO A	PROTOTIPO B	PROTOTIPO C
Cp MÁXIMO	0,27	0,25	0,14	0,43
% DE INCREMENTO DE EFICIENCIA	100	95	53	159

Fuente: Elaboración propia.

4.7. Cálculo de generación eléctrica proyectada.

4.7.1. Determinación del lugar y número de horas por velocidad de viento

Se elije el punto correspondiente a la coordenada 227085 E - 8751618 S Zona 18L (*Figura 40-Figura 464*) a la que corresponden las velocidades de viento de las *Figura 47Figura 50*.

4.7.2. Determinación de factor de escala y parámetros de cálculo

Para realizar el cálculo de la generación eléctrica proyectada se toma de la Tabla 23 el C_p 0.43 que corresponde al Prototipo C.

El escalamiento del prototipo se realiza en base a los datos de diseño

Tabla 24.

Escalamiento de dimensiones de rotor

Especificaciones del Prototipo de álabes fijas	Factor de escala			
	1	10	15	20
Diámetro del rotor (\emptyset) m	0,240	2,400	3,600	4,800
Número de etapas	1	2	2	2
Altura de álabe (m)	0,185	1,850	2,775	3,700
Altura de aerogenerador (A) m	0,185	3,700	5,550	7,400
Área de barrido de rotor m ²	0,044	8,880	19,980	35,520

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 25.

Dimensiones de rotor a escala x10 y parámetros de cálculo.

Parámetros de cálculo		Unidad
Densidad de aire (ρ)	1,17	Kg/m ³
Capacidad de potencia (C_p)	0,43	-
Factor de escala (F_e)	10	-
Número de etapas	2	Cant.
Diámetro del rotor (\emptyset)	2,40	m
Altura de álabe	1,85	m
Altura de aerogenerador (A)	3,70	m
Área de barrido de rotor	8,88	m ²
Rendimiento de variador de velocidad (R_v)	0,95	-
Rendimiento de generador eléctrico (R_g)	0,85	-
Rendimiento de rodamiento (R_r)	0,99	-
Numero de aerogeneradores	10	Cant.

Fuente: Elaboración propia.

La densidad de aire es la que señala el aplicativo web del MINEM (MINEM, 2019) (Figura 44). La capacidad de potencia y los rendimientos de variador (Rv), generador (Rg) y rodamiento son adimensionales (Rr). (Torres, Morimitsu D., 2015)

4.7.3. Cálculo de potencia de energía de viento disponible, energía de viento extraída, proyección de energía eléctrica que se generaría anualmente:

$$\text{Potencia de viento disponible} = \frac{1}{2} \times \rho \times \left(\frac{Kg}{m^3} \right) \times A (m^2) \times v^3$$

$$\text{Potencia extraída } (W_e) = \text{Potencia disponible } (W) \times (C_p) \times (Rv) \times (Rg) \times (Rr)$$

$$\text{Generación eléctrica proyectada} = \text{Potencia extraída } (W_e) \times \# \text{ horas de viento}$$

$$\text{Generación eléctrica parque eólico} = (\text{Generación proyectada}) \times (\# \text{ de aerogeneradores})$$

Tabla 26.

Proyección de generación de energía eléctrica del parque eólico.

Velocidad de viento (m/s)	Horas de velocidad de viento	Porcentaje de velocidad de viento	Potencia de viento disponible (W)	Potencia de viento extraído (w)	Generación eléctrica proyectada (KW/hora)
3	1314	15,0%	140,26	47,72	62,71
3,5	438	5,0%	222,73	75,78	33,19
4	438	5,0%	332,47	113,12	49,55
4,5	438	5,0%	473,38	161,07	70,55
5	438	5,0%	649,35	220,94	96,77
5,5	526	6,0%	864,28	294,08	154,68
6	526	6,0%	1122,08	381,79	200,82
6,5	438	5,0%	1426,62	485,42	212,61
7	438	5,0%	1781,82	606,27	265,55
7,5	438	5,0%	2191,56	745,69	326,61
8	438	5,0%	2659,74	904,99	396,39
8,5	350	4,0%	3190,26	1085,50	379,93
9	350	4,0%	3787,01	1288,55	450,99
9,5	350	4,0%	4453,89	1515,46	530,41
10	263	3,0%	5194,80	1767,56	464,87
10,5	263	3,0%	6013,63	2046,17	538,14
11	263	3,0%	6914,28	2352,62	618,74
11,5	175	2,0%	7900,64	2688,23	470,44
12	175	2,0%	8976,61	3054,34	534,51
12,5	173	2,0%	10146,09	3452,26	597,24
13	88	1,0%	11412,98	3883,32	341,73
13,5	88	1,0%	12781,16	4348,85	382,70
14	88	1,0%	14254,53	4850,18	426,82
14,5	88	1,0%	15837,00	5388,62	474,20
15	88	1,0%	17532,45	5965,50	524,96
15,5	88	1,0%	19344,79	6582,16	579,23
Generación eléctrica por aerogenerador proyectada (KW-año)					9 184,34
Generación eléctrica de parque eólico proyectada (MW-año)					91,84

Fuente: Elaboración propia.

4.8. Cálculo del ahorro de CO₂

El cálculo de ahorro de CO₂ se realizó teniendo como referencia la Resolución Directoral N°157-2005-M/AAE con fecha 28 de abril 2005, en la cual se resuelve Aprobar el Estudio de Impacto Ambiental de la Central Termoeléctrica de Gas, ubicado en el distrito de Chilca, provincia de Cañete, departamento de Lima, presentado por la *Empresa Generación Eléctrica De Chilca S.A. (EGECHILCA)*. En dicha resolución se anexa el informe N073-2005-MEN-AAE/MU – Evaluación del levantamiento de observación del EIA de la central termoeléctrica de gas, el cual detalla la cantidad de Gases de efecto invernadero (GEI) que se emite a la atmósfera. (Figura 51)

PERÚ Ministerio de Energía y Minas Extranet

Consulta de Resolución

Regresar Manual de Usuario

BUSCAR

Busqueda General:
157-2005

Tipo de documento:
EIA

Estado:
APROBADOS

Sub Sector:
ELECTRICIDAD

Región
Lima

Provincia
Cañete

Distrito
Chilca

Buscar

**MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS
SISTEMA DE INFORMACIÓN AMBIENTAL**

EIA (Estudio de Impacto Ambiental)

N° DE EXPEDIENTE: 1506582 (10/12/2004 00:00:00)

EMPRESA O TITULAR	EMPRESA DE GENERACION ELECTRICA DE CHILCA S.A.		
NOMBRE DE LA UNIDAD	CENTRAL TERMOELÉCTRICA DE GAS		
NOMBRE DEL PROYECTO	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL DE LA CENTRAL TERMOELECTRICA DE GAS		
SUBSECTOR	ELECTRICIDAD		
N° RESOLUCION	157-2005-MEM-AAE	FECHA	28/04/2005
UBICACION	DEPARTAMENTO LIMA	PROVINCIA CAÑETE	DISTRITO CHILCA

** 15725 Visita(s) **

Figura 23. Búsqueda de resolución de aprobación de EIA.

Fuente: Motor de búsqueda del MINEM

Con los datos consignados en la sección de Descripción del Proyecto del informe anteriormente mencionado se elaboró la Tabla 27 en la cual se realiza un balance de materia y energía. Teniendo en cuenta la generación anual proyectada por el parque eólico (Tabla 26).

Tabla 27.

Generación eléctrica nominal, balance de materia y energía – termoeléctrica, parque eólico.

PARÁMETROS DE OPERACIÓN Y DE EMISIONES	GENERACIÓN NOMINAL DE CENTRAL TERMO ELÉCTRICA ANUAL (MW)	GENERACIÓN NOMINAL PARQUE EÓLICO ANUAL (MW)	UNIDADES
	520	91.84	
Flujo requerido de Gas Natural (GN)	3 270 000	577 554	pie ³ /h
Peso del GN estimado		0,768	
Flujo en peso de GN	19,35	3,42	kg/s.
Cálculo del aire necesario (estequiométrico)	16,72	2,95	kg de aire/kg de GN
Formación de CO ₂		2,76	
Cantidad de CO ₂ 2.76 x flujo en peso de GN	53,406	9,433	kg de CO ₂ /s.
Formación de H ₂ O		2,11	
Cantidad de H ₂ O 2.11 x flujo en peso de GN	40,83	7,211	kg de H ₂ O/s
Formación NO _x :		0,083	
Cantidad de NO _x : 0.083 x flujo en peso de GN	1,606	0,284	kg de NO _x /s
Formación de CO		0,021	
Cantidad de CO 0.021 x flujo en peso de GN	0,406	0,072	kg de CO/S.
Cantidad de contaminantes (CO ₂ + CO + NO _x)	55,418	9,788	kg/s.
Operación de la Planta		7500	horas/año
		27 000 000	segundos

Fuente: Elaboración propia.

Nota: Los datos que corresponden a la central termoeléctrica son copia fiel del EIA, los datos de generación nominal anual del parque eólico se obtienen por regla de tres simple.

Los valores de la (Tabla 27) corresponden a la generación de GEI anual, teniendo en cuenta los segundos de operación de planta que indica en el EIA de la central termoeléctrica.

Tabla 28.

Producción anual de GEI según EIA y ahorro de parque eólico.

GEI	UNIDADES	PRODUCCIÓN ANUAL DE GEI DE LA CENTRAL TERMOELÉCTRICA	AHORRO ANUAL DE GEI DEL PARQUE EÓLICO PROYECTADO
C02	TM/año	1 442 000	254 689
H20	TM/año,	1 102 000	194 637
NOX	TM/año (sin tratamiento)	43 360	7 658
CO	TM/año (sin tratamiento)	10 962	1 936

Fuente: Elaboración propia.

Nota: Los datos se obtienen multiplicando el flujo masico de cada compuesto por la cantidad de segundos de operación de la planta.

CAPÍTULO V. DISCUSIÓN

Discusión de resultados

En la investigación se lograron realizar todas las simulaciones planteadas en la metodología, pero hubo condiciones no previstas que provocaron dificultades para realizarlas, las mismas que menciono a continuación:

La velocidad de viento no fue homogénea dentro del túnel de viento a causa del ventilador que se utilizó en la etapa de evaluación y el desfase a la izquierda en relación a la línea de eje de giro del modelo, esta configuración no afecta en la evaluación de los modelos, pero no es una condición óptima de evaluación. (*Figura 7*)

El ventilador nos proporcionó vientos constantes de 2,9, 3,9.6 y 4,8 m/s muy útiles para la determinación de la capacidad de potencia de los modelos evaluados a condiciones de velocidades de viento bajas, pero nos restringe el determinar el rendimiento a velocidades de viento mayores.

Las dimensiones del modelo de álabes SAVONIUS clásico evaluado que se utiliza como referencia para hallar el incremento de la eficiencia es un modelo a escala 1:5 de la turbina que evalúa Fiestas, (2015). Las dimensiones guardan relación, pero la capacidad de potencia (C_p) del modelo original es 0,49 y el modelo a escala es 0,27, tomar en cuenta que las simulaciones en condiciones distintas, el modelo original se evaluó en condiciones de campo con velocidades viento fluctuantes, el modelo a escala se evaluó controlando la velocidad de viento (flujo constante), además se realizó una evaluación más exhaustiva con una mayor generación de datos.

Otro factor a tener en cuenta es la distribución de las masas que repercute en el momento de inercia de la turbina.

CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

Después del análisis de los datos obtenidos durante la evaluación se concluye que la eficiencia de captación de energía cinética del viento se incrementa un 159% con el Prototipo C en comparación los álabes de un aerogenerador SAVONIUS clásico. (Tabla 23)

Para poder llegar a esta conclusión, se abordaron los siguientes objetivos específicos

Objetivo específico 1: Identificar el rango de velocidad de viento de operación del prototipo de aerogenerador SAVONIUS.

Se determinó que el rango de velocidad de viento en el que opera el Prototipo es de los 2,5 m/s a más. (Tabla 22), dato importante para hallar un lugar donde realizar la simulación matemática.

Objetivo específico 2: Calcular el coeficiente de potencia (C_p) del prototipo de aerogenerador SAVONIUS.

El coeficiente de potencia del Prototipo – C es de 0,23. Importante dato para poder realizar la simulación matemática de generación de eléctrica de un parque eólico

Objetivo específico 3: Proyectar el ahorro de CO₂ con el prototipo de aerogenerador SAVONIUS.

Realizando la simulación matemática del Prototipo – C con 2 etapas a una escala x10 en las coordenadas 227085 E, 8751618 S, ZONA 18 S que presentan características de viento descritas en la tabla 24 y teniendo como referencia la producción de energía eléctrica y generación de CO₂ de la Central Termoeléctrica (Tabla 27) se concluye que es posible ahorrar (dejar de generar) 254 689 TM/año de CO₂ (Tabla 28) con lo que podemos

6.2. Recomendaciones

Evaluar el prototipo de los álabes con velocidades de viento mayores y con una distribución del viento más homogénea en el túnel de viento.

Evaluar el prototipo de turbina con unos direccionadores de viento tomando en cuenta la disposición del ventilador y la dirección del viento en relación a la línea de eje de giro del modelo.

Evaluar la distribución de las masas, su efecto en la inercia de la turbina y determinar la distribución ideal para un óptimo desempeño.

Diseñar un dispositivo que logre modificar el momento de inercia de una turbina durante el trabajo.

REFERENCIAS

- Carrasco, S. (2015). *Metodología de la investigación*. Lima, Perú: San Marcos.
- Espitia, C., & Puerto, L. (2014). *Diseño y construcción de un mini aerogenerador de eje vertical* (tesis de pregrado). Recuperado de <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/13797/Libro.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- Fiestas, C. J., Lizárraga, B. B., Nunja, J. V., Quispe, C., y Rojas, J. (2016). Diseño y Construcción de un Aerogenerador Tipo Savonius Multietapa. *Bing Bang Faustiniiano*, 5(4), 37-43. Doi: <https://doi.org/10.51431/bbf.v5i4.35>
- Figueroa, E. V. (18 de 01 de 2021). *Perú: Centro de simulación en seguridad y defensa nacional*. Recuperado de <https://investsocperu.medium.com/per%C3%BA-centro-de-simulaci%C3%B3n-en-seguridad-y-defensa-nacional-7a8123f21cf5>
- Gerónimo, E. (2010). *Fundamentos de la generación eléctrica mediante energía eólica*. Veracruz: Universidad Veracruzana.
- Hidrolate. (08 de 10 de 2020). Recuperado de <https://hidrolate.wordpress.com/tema/>
- Luque, A. M. (2017). *Diseño, construcción y control de un aerogenerador de equipo de prácticas de bajo coste* (tesis de pregrado). Recuperado de <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/91288/fichero/tfg+maria+paz+luque.pdf>
- Ministerio de Energía y Minas - MINEM. (2014). *Plan Energético Nacional - Resumen ejecutivo 2014 – 2025*. Recuperado de http://www.minem.gob.pe/_detalle.php?idSector=10&idTitular=6397
- Ministerio de Energía y Minas - MINEM. (2016). *Atlas eólico del Perú*. Recuperado de http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/Electricidad/publicaciones/Atlas_Eolico_Final.pdf
- Ministerio de Energía y Minas - MINEM. (12 de 02 de 2019). *Mapas eólicos*. Recuperado de http://mapas.minem.gob.pe/map_eolico/
- Ministerio de Energía y Minas - MINEM (Setiembre 2019). *Principales indicadores del Sector Eléctrico a nivel Nacional*. Recuperado de http://www.minem.gob.pe/_detalle.php?idSector=6&idTitular=9926
- Ministerio de Energía y Minas. (18 de 01 de 2021). Recuperado de <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/376317/0157-2005-MEM-AAE.pdf>

- SKF. (14 de 10 de 20). *Catálogo de rodamiento SKF*. Recuperado de https://www.skf.com/binaries/pub201/Images/0901d19680416953-Rolling-bearings---17000_1-ES_tcm_201-121486.pdf#cid-121486
- Torres, D. (2015). *Diseño de un aerogenerador eólico de eje vertical de baja potencia* (tesis de pregrado). Recuperado de <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/5145/621312136T693.pdf?sequence=1>
- Villarubina, L. M. (2013). *Ingeniería de la energía eólica*. Mexico D.F.: Alfaomega.

ANEXOS

ANEXO 1. MATRIZ DE CONSISTENCIA

Tabla 29.

Matriz de consistencia

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES E INDICADORES	METODOLOGÍA
<p>Problema General</p> <p>¿Cuánto es posible optimizar la captación de energía eólica con el prototipo de aerogenerador SAVONIUS?</p>	<p>Objetivo General</p> <p>Optimizar la captación de la energía eólica con el prototipo de aerogenerador SAVONIUS.</p>	<p>Hipótesis General</p> <p>H1: Con el prototipo de aerogenerador SAVONIUS NO se optimiza a captación de energía eólica.</p> <p>H0: Con el prototipo de aerogenerador SAVONIUS se optimiza a captación de energía eólica.</p>	<p>Variable independiente</p> <p>Diseño y construcción de un prototipo de aerogenerador SAVONIUS.</p>	<p>Diseño metodológico</p> <p>Tipo: Experimental Prospectivo Transversal</p> <p>Nivel: Aplicado</p>
<p>Problemas Específicos</p> <ul style="list-style-type: none"> • ¿Cuál es el rango de velocidad de viento de operación del prototipo de aerogenerador SAVONIUS? • ¿Cuál es el Cp óptimo del prototipo de aerogenerador SAVONIUS? • ¿Cuánto CO2 es posible ahorrar con el prototipo de aerogenerador SAVONIUS? 	<p>Objetivos Específicos</p> <ul style="list-style-type: none"> • Identificar el rango de velocidad de viento de operación del prototipo de aerogenerador SAVONIUS. • Calcular el coeficiente de potencia (Cp) del prototipo de aerogenerador SAVONIUS. • Proyectar el ahorro de CO2 con el prototipo de aerogenerador SAVONIUS. 	<p>Hipótesis Específicos</p> <ul style="list-style-type: none"> • Es posible identificar el rango de velocidad de viento de operación del prototipo de aerogenerador SAVONIUS • Es posible calcular el coeficiente de potencia (Cp) del prototipo de aerogenerador SAVONIUS. • Es posible proyectar el ahorro de CO2 del prototipo de aerogenerador SAVONIUS 	<p>Indicadores</p> <ul style="list-style-type: none"> • Dimensiones (m) • Materiales (adecuado, no adecuado) • Potencia nominal del diseño (W) • Poca tolerancia (mili mm), mucha tolerancia (d mm) <p>Variable dependiente</p> <p>Optimización de captación de energía eólica.</p> <p>Indicadores</p> <ul style="list-style-type: none"> • Torque estático - Nm • Revoluciones por minuto • Coeficiente de Potencia (Cp) -adimensional • KW/año • Kg. CO2/Kw*h 	<p>Diseño: Experimental</p> <p>Enfoque: Cuantitativo</p> <p>Población y muestra</p> <p>Población: El modelo de turbina SAVONIUS clásico y el Un modelo de PROTOTIPO tipo SAVONIUS modificado</p> <p>Muestra: Todas las mediciones que se realizaron, (288) de la combinación de posición de medición y las 3 velocidades de viento además de las RPM de cada modelo (12).</p>

Fuente: Elaboración propia., 2019.

ANEXO 2. INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN

Tabla 30.

Formato registro de fuerza medida y cálculo de fuerza real

	0°		15°		30°		45°		60°		75°	
V _v (m/s)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)
I												
II												
III												
	90°		105°		120°		135°		150°		165°	
V _v (m/s)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)
I												
II												
III												
	180°		195°		210°		225°		240°		255°	
V _v (m/s)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)
I												
II												
III												
	270°		285°		300°		315°		330°		345°	
V _v (m/s)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)	Fuerza medida (gr)	Fuerza real (gr)
I												
II												
III												

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 3. MATERIAL FOTOGRÁFICO

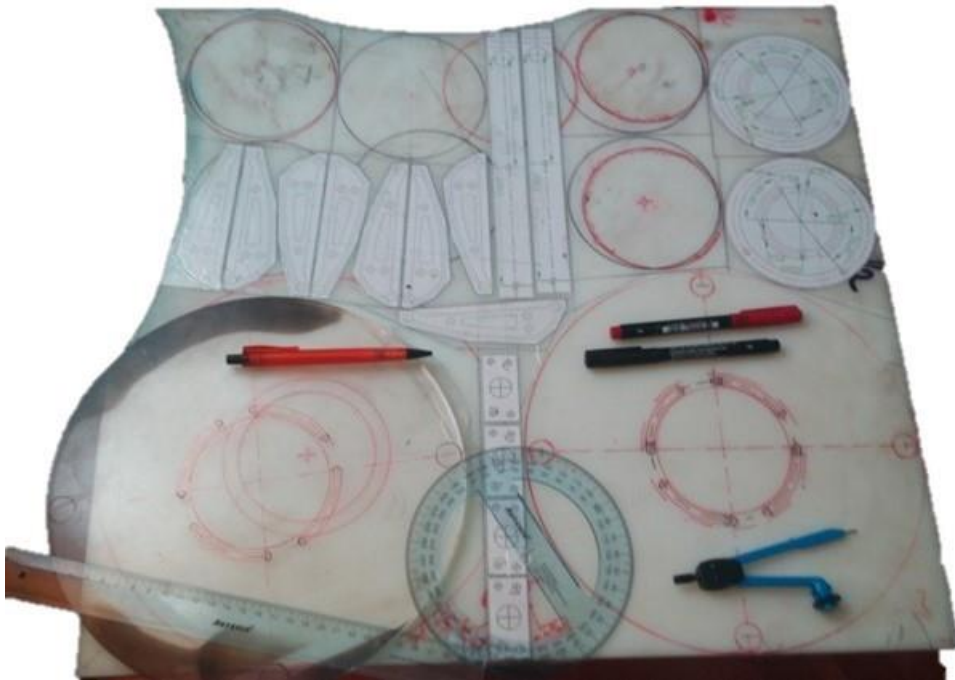


Figura 24. Trazado en nylon.



Figura 25. Machina para fresado de piezas en serie.

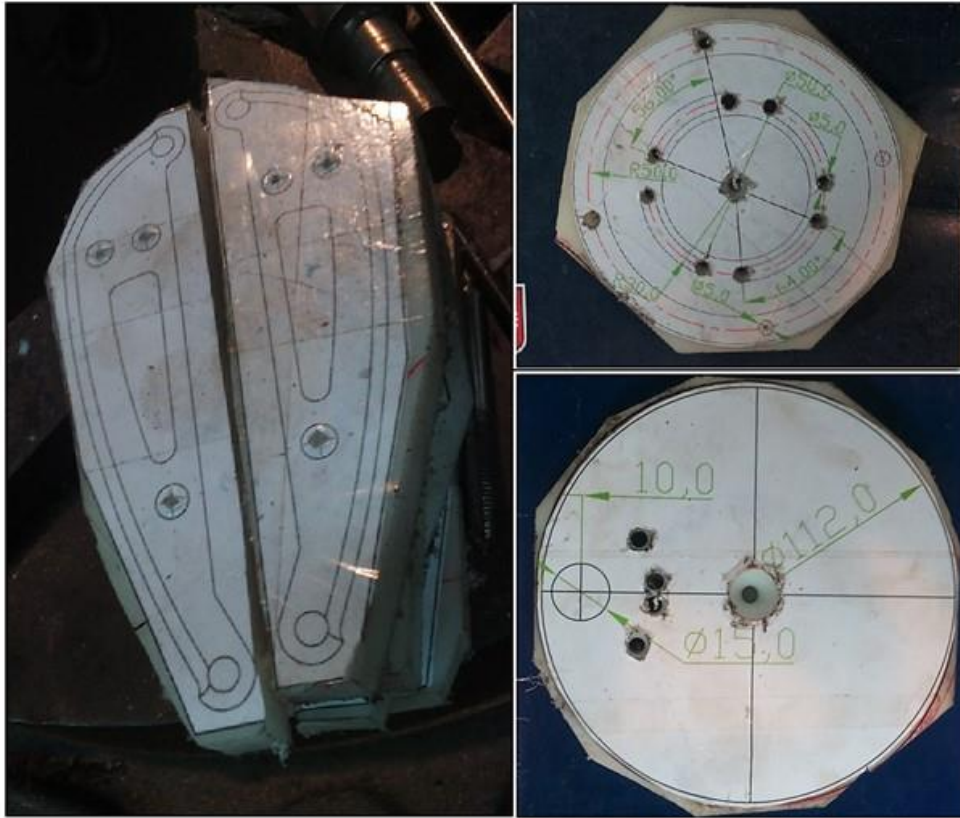


Figura 26. Piezas cortadas.



Figura 27. Proceso de taladrado.



Figura 28. Proceso de torneado de piezas.

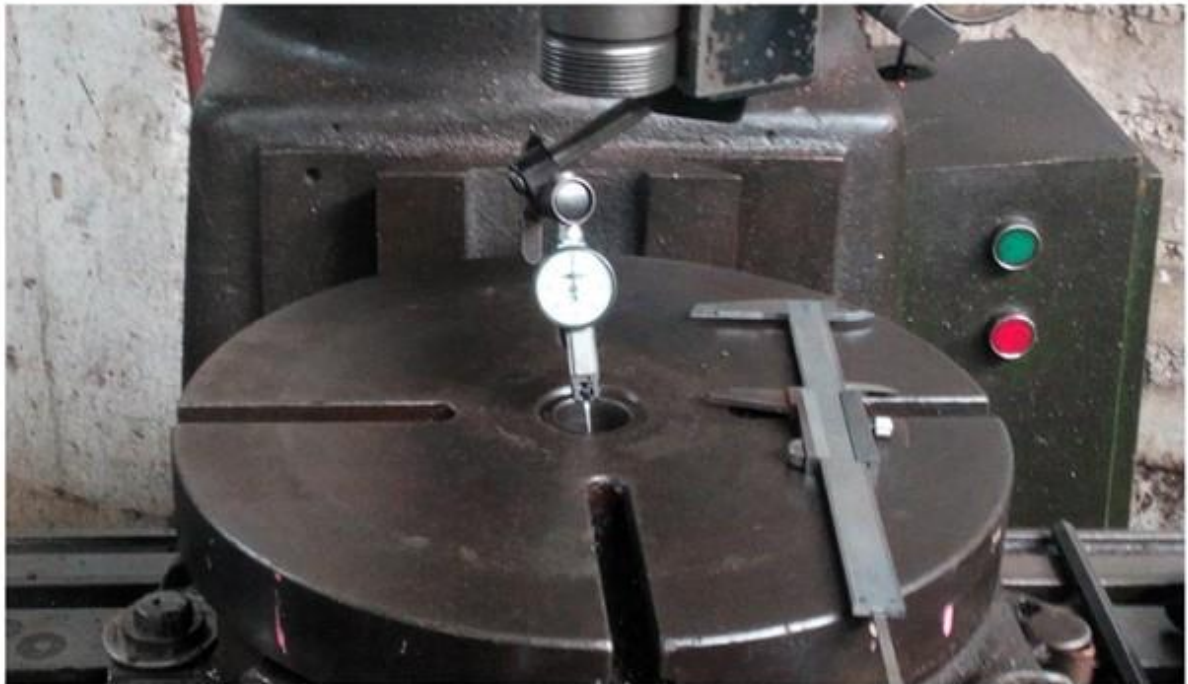
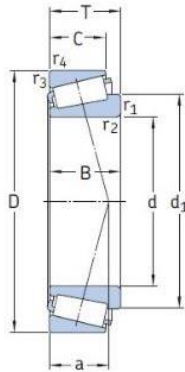


Figura 29. Proceso de control de fabricación en torno y fresadora.



Figura 30. Proceso de fabricación de soportes de álabes.

7.1 Rodamientos de una hilera de rodillos cónicos métricos d 15–32 mm

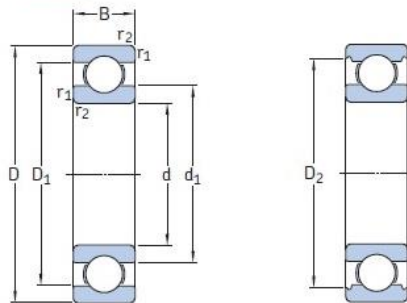


Dimensiones principales			Capacidad de carga básica		Carga límite de fatiga P_u	Velocidades nominales		Masa	Designación	Series de dimensiones para la normativa ISO 355 (ABMA)
d	D	T	dinámica C	estática C_0		Velocidad de referencia	Velocidad límite			
mm			kN		kN	r. p. m.		kg	-	-
15	42	14,25	22,4	20	2,08	13 000	18 000	0,094	30302 J2	2FB
17	40	13,25	19	18,6	1,83	13 000	18 000	0,079	30203 J2	2DB
	47	15,25	28,1	25	2,7	12 000	16 000	0,13	30303 J2	2FB
	47	20,25	34,7	33,5	3,65	11 000	16 000	0,17	32303 J2/Q	2FD

Figura 31. Especificaciones de rodamiento cónico 30302.

Fuente (SKF, 20)

1.1 Rodamientos rígidos de una hilera de bolas d 3–10 mm

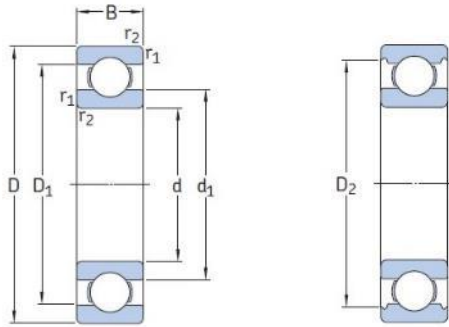


Dimensiones principales			Capacidad de carga básica		Carga límite de fatiga P_u	Velocidades nominales		Masa	Designación
d	D	B	dinámica C	estática C_0		Velocidad de referencia	Velocidad límite		
mm			kN		kN	r. p. m.		kg	-
3	10	4	0,54	0,18	0,007	130 000	80 000	0,0015	623
4	9	2,5	0,423	0,116	0,005	140 000	85 000	0,0007	618/4
	11	4	0,624	0,18	0,008	130 000	80 000	0,0017	619/4
	12	4	0,806	0,28	0,012	120 000	75 000	0,0021	604
	13	5	0,936	0,29	0,012	110 000	67 000	0,0031	624
	16	5	1,11	0,38	0,016	95 000	60 000	0,0054	634
5	11	3	0,468	0,143	0,006	120 000	75 000	0,0012	618/5
	13	4	0,884	0,335	0,014	110 000	70 000	0,0025	619/5
	16	5	1,14	0,38	0,016	95 000	60 000	0,005	625
	19	6	2,34	0,95	0,04	80 000	50 000	0,0085	635

Figura 32. Especificaciones de rodamiento de bolas 625

Fuente (SKF, 20)

1.1 Rodamientos rígidos de una hilera de bolas d 12 – 22 mm



Dimensiones principales			Capacidad de carga básica		Carga límite de fatiga	Velocidades nominales		Masa	Designación
d	D	B	dinámica C	estática C ₀	P _u	Velocidad de referencia	Velocidad límite		
mm			kN		kN	r. p. m.		kg	-
12	21	5	1,74	0,915	0,039	70 000	43 000	0,0063	61801
	24	6	2,91	1,46	0,062	67 000	40 000	0,011	61901
	28	8	5,4	2,36	0,1	60 000	38 000	0,021	* 6001
	30	8	5,07	2,36	0,1	60 000	38 000	0,026	16101
	32	10	7,28	3,1	0,132	50 000	32 000	0,037	* 6201
	37	12	10,1	4,15	0,176	45 000	28 000	0,06	* 6301
15	24	5	1,9	1,1	0,048	60 000	38 000	0,0065	61802
	28	7	4,36	2,24	0,095	56 000	34 000	0,016	61902
	32	8	5,85	2,85	0,12	50 000	32 000	0,03	* 16002
	32	9	5,85	2,85	0,12	50 000	32 000	0,03	* 6002
	35	11	8,06	3,75	0,16	43 000	28 000	0,045	* 6202
	42	13	11,9	5,4	0,228	38 000	24 000	0,082	* 6302

Figura 33. Especificaciones de rodamiento de bolas 6202

Fuente (SKF, 20)



Figura 34. Vista superior, frontal y posterior del montaje del proyecto.



Figura 35. Ángulos de giro para evaluación.

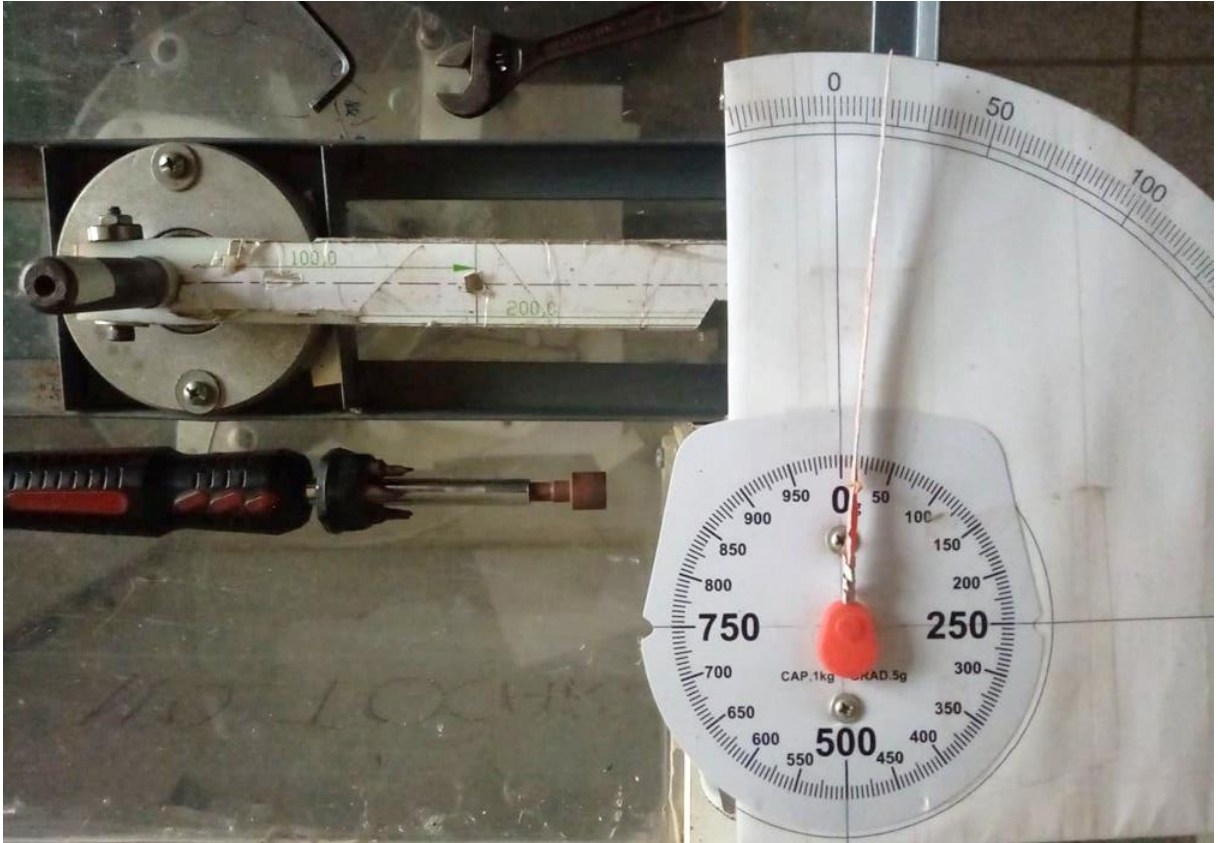


Figura 36. Sistema para medir gr-fuerza.



Figura 37. Medición de RPM con tacómetro digital.



Figura 38. Medición de velocidad de viento con anemómetro digital.

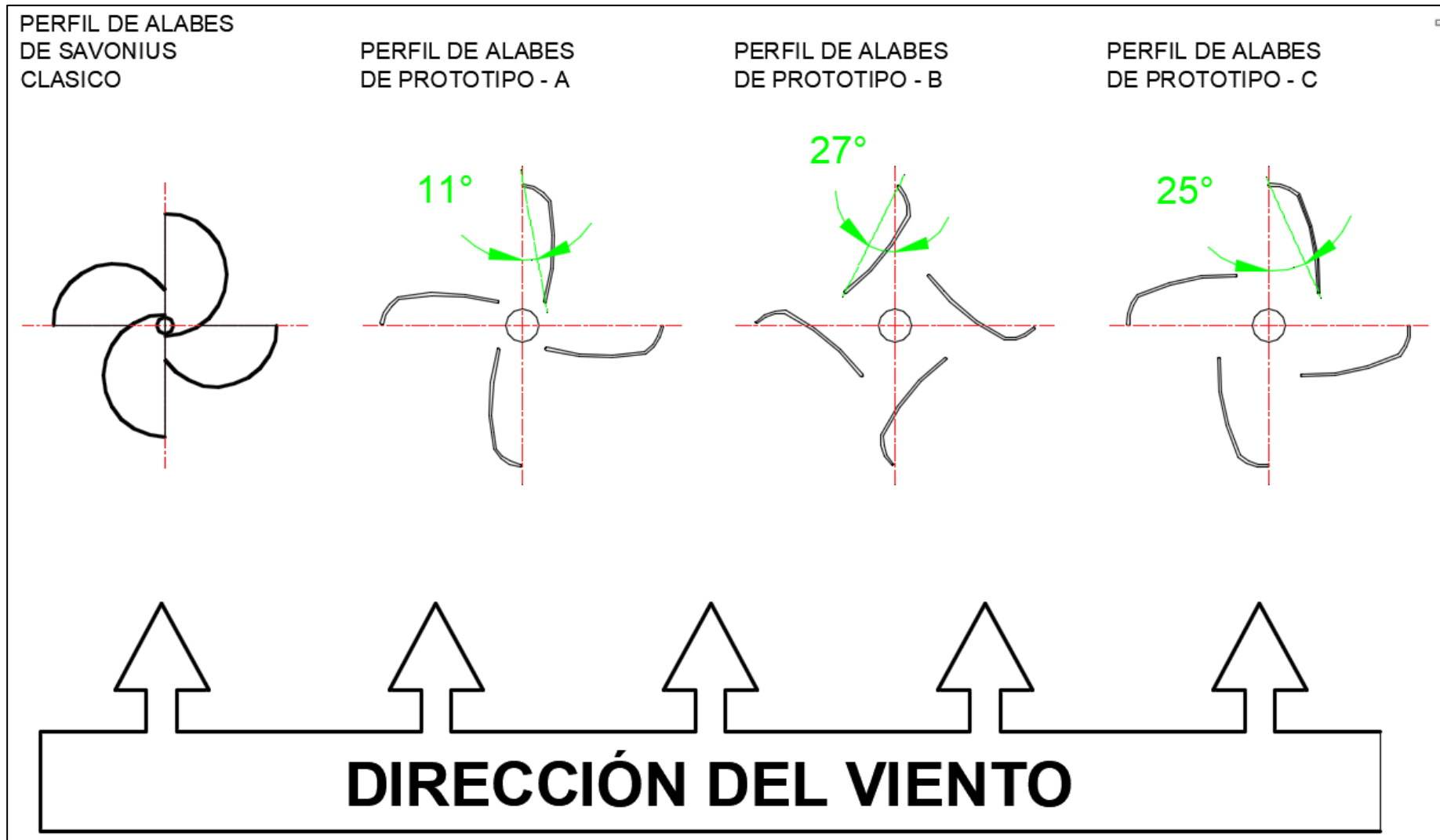


Figura 39. Perfil de álabes y configuración en la turbina respecto a la dirección del viento

Fuente: Elaboración propia.

E.1. VELOCIDAD MEDIA ANUAL DEL VIENTO A 10 m

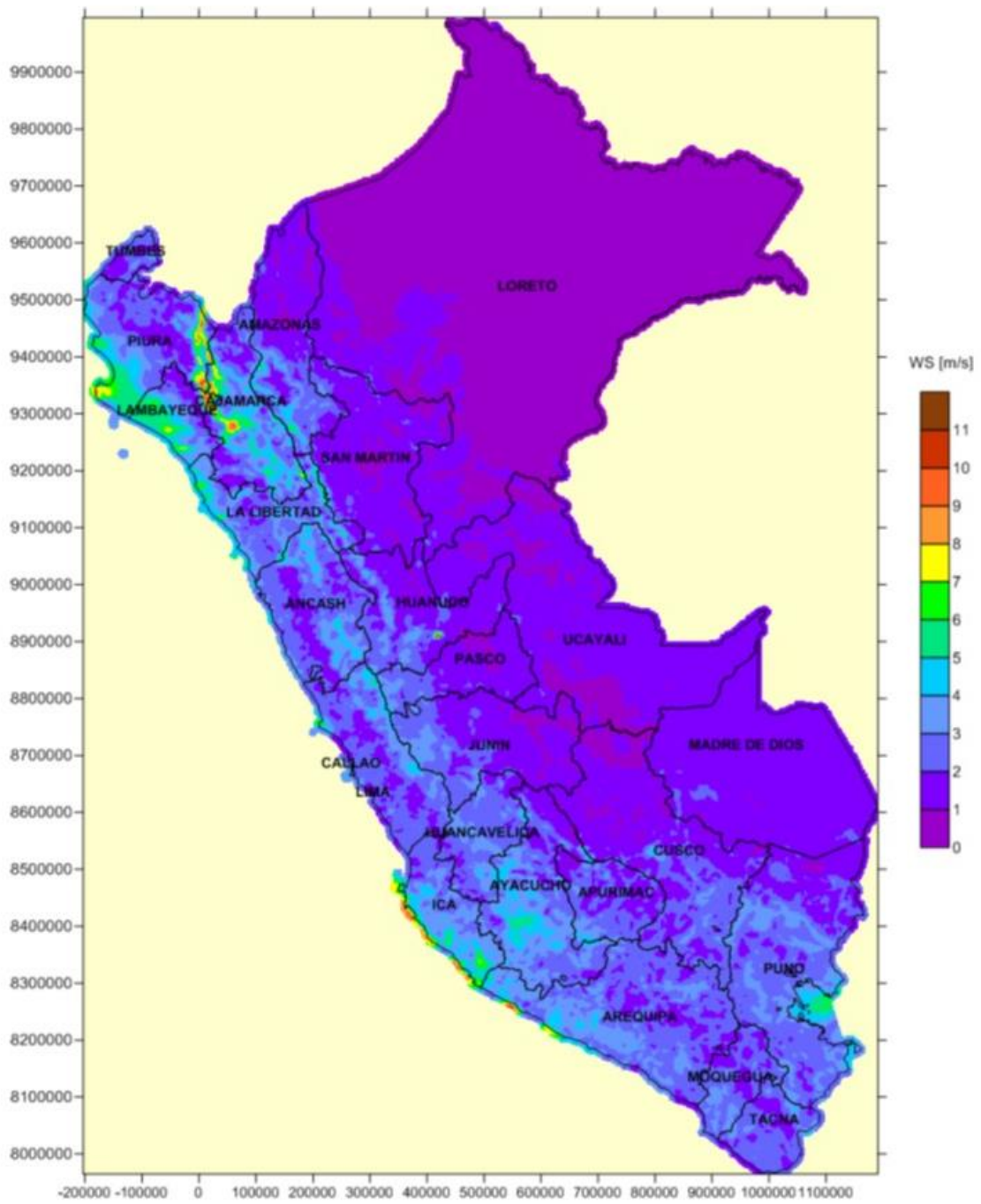


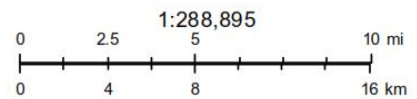
Figura 40. Viento medio anual a 10 m
Fuente (MINEM, 2016)

ATLAS EÓLICO - MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS

Mapa Contenido Estudio Eólico del Perú



August 30, 2019 15:45:39



Sources: Esri, HERE, Garmin, Intermap, increment P Corp., GEBCO, USGS, FAO, NPS, NRCAN, GeoBase, IGN, Kadaster NL, Ordnance Survey, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community

Figura 41. Mapa de ubicación del Parque eólico Proyectado.

Recuperado http://mapas.minem.gob.pe/map_eolico/ (MINEM, 2019).



Figura 42. Mapa de ubicación del Parque eólico Proyectoado.

Fuente: Google Earth.

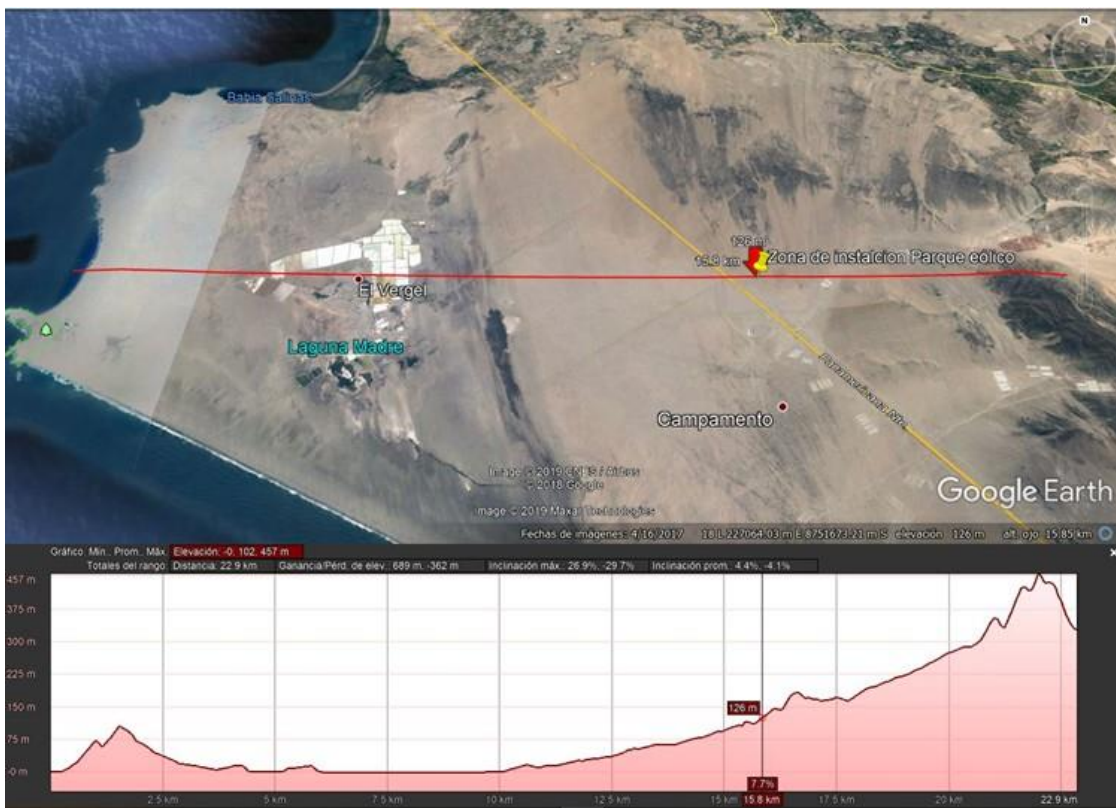


Figura 43. Mapa de ubicación y elevación del Parque eólico Proyectoado-corte este-oeste.

Fuente: Google Earth.

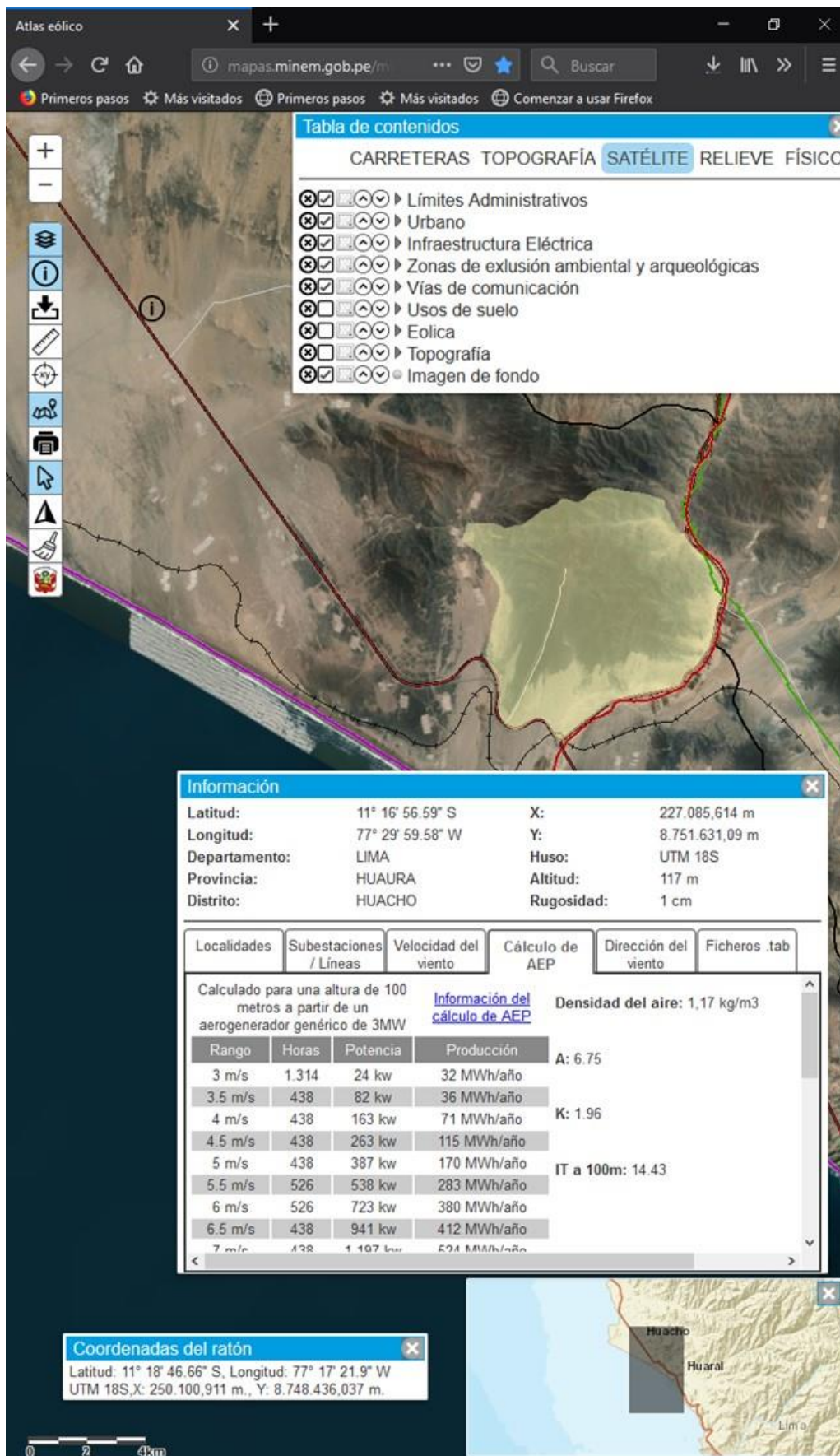


Figura 44. Aplicativo web del Ministerio de Energía y Minas (MINEM)
 Fuente: Recuperado de http://mapas.minem.gob.pe/map_eolico/ (MINEM, 2019)

Información					
Latitud:	11° 16' 57.02" S	X:	227.085,586 m		
Longitud:	77° 29' 59.59" W	Y:	8.751.618,005 m		
Departamento:	LIMA	Huso:	UTM 18S		
Provincia:	HUAURA	Altitud:	117 m		
Distrito:	HUACHO	Rugosidad:	1 cm		

Localidades	Subestaciones / Líneas	Velocidad del viento	Cálculo de AEP	Dirección del viento	Ficheros .tab
Localidad		Distancia			
LOS TRIGALES		6.627 m			
LA SALINAS		8.578 m			
COCO RICO		8.673 m			
ROCIO		9.082 m			
DANIELA		9.812 m			
EL ROSARIO		9.877 m			

Figura 45. Localidades cercanas al Parque eólico proyectado.

Fuente (MINEM, 2019)

Información					
Latitud:	11° 16' 57.02" S	X:	227.085,586 m		
Longitud:	77° 29' 59.59" W	Y:	8.751.618,005 m		
Departamento:	LIMA	Huso:	UTM 18S		
Provincia:	HUAURA	Altitud:	117 m		
Distrito:	HUACHO	Rugosidad:	1 cm		

Localidades	Subestaciones / Líneas	Velocidad del viento	Cálculo de AEP	Dirección del viento	Ficheros .tab
Tipo	Nombre	Distancia			
Línea	S.E. ZAPALLAL - S.E. PARAMONGA NUEVA	9.944 m			
Línea	LT SE CHEVES - SE HUACHO	18.575 m			
Línea	SE HUACHO NUEVA - SE ANDAHUASI	18.895 m			
Línea	SE HUACHO REP - SE HUACHO EDELNOR	19.149 m			
Línea	LT500KV SE CARABAYLLO - SE CHIMBOTE NUEVO	24.229 m			
Línea	S.E. PARAMONGA NUEVA - S.E. HUACHO	24.355 m			
Línea	SUBESTACION ANDAHUASI	32.486 m			
		39.271			

Figura 46. Subestaciones/ líneas cercanas al Parque eólico proyectado.

Fuente (MINEM, 2019)



Figura 47. Número de horas por velocidad de viento en el Parque eólico proyectado.
Fuente (MINEM, 2019)

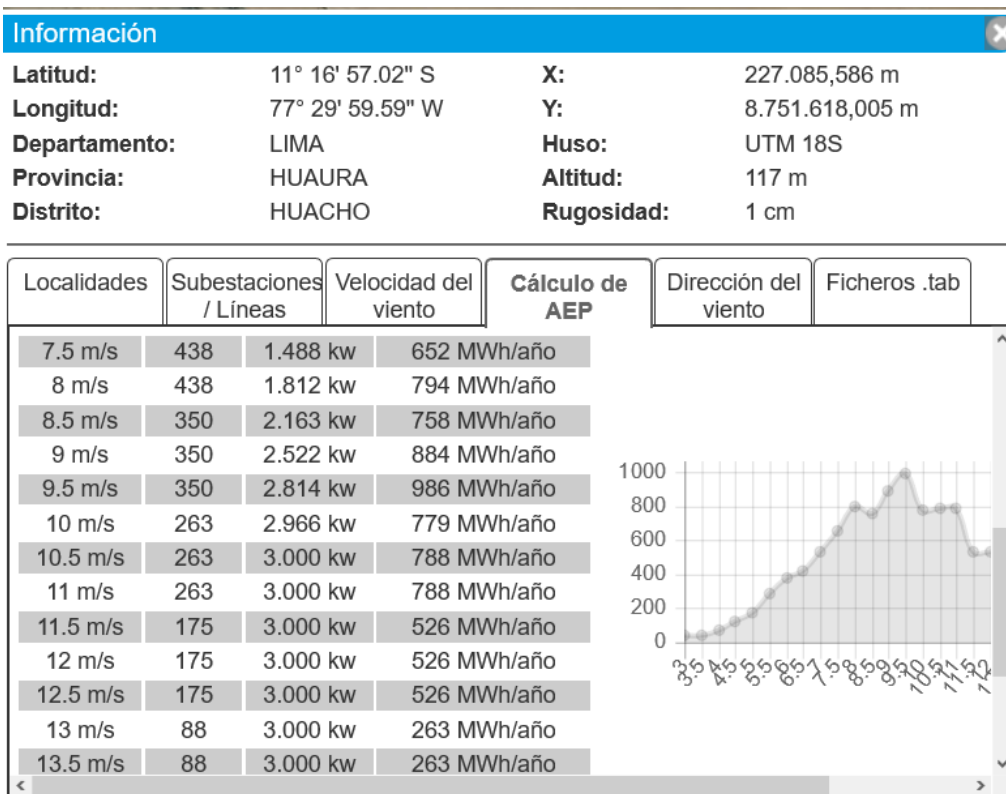


Figura 48. Número de horas por velocidad de viento en el Parque eólico proyectado.
Fuente (MINEM, 2019)

Información ✕

Latitud:	11° 16' 57.02" S	X:	227.085,586 m
Longitud:	77° 29' 59.59" W	Y:	8.751.618,005 m
Departamento:	LIMA	Huso:	UTM 18S
Provincia:	HUAURA	Altitud:	117 m
Distrito:	HUACHO	Rugosidad:	1 cm

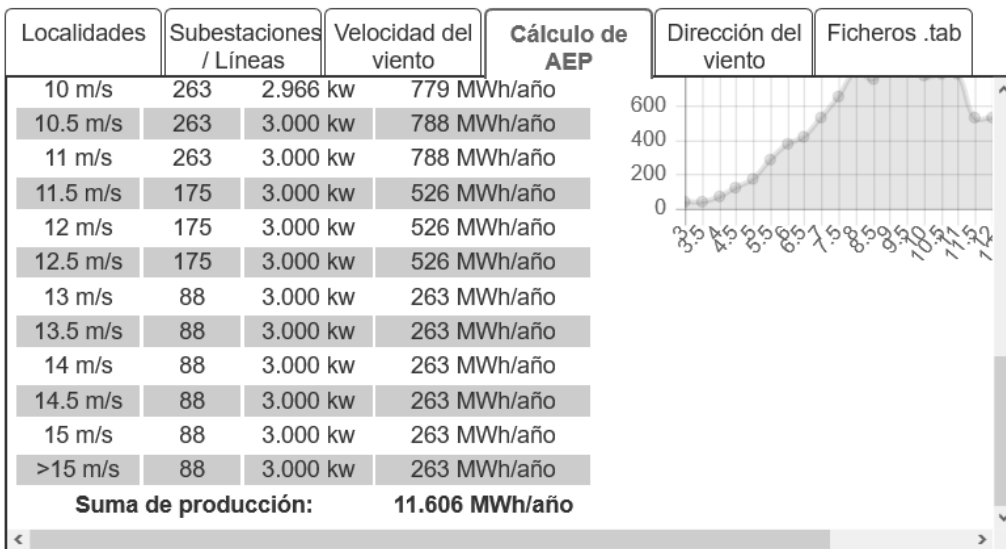


Figura 49. Número de horas por velocidad de viento en el Parque eólico proyectado.

Fuente (MINEM, 2019)

Información ✕

Latitud:	11° 16' 57.02" S	X:	227.085,586 m
Longitud:	77° 29' 59.59" W	Y:	8.751.618,005 m
Departamento:	LIMA	Huso:	UTM 18S
Provincia:	HUAURA	Altitud:	117 m
Distrito:	HUACHO	Rugosidad:	1 cm

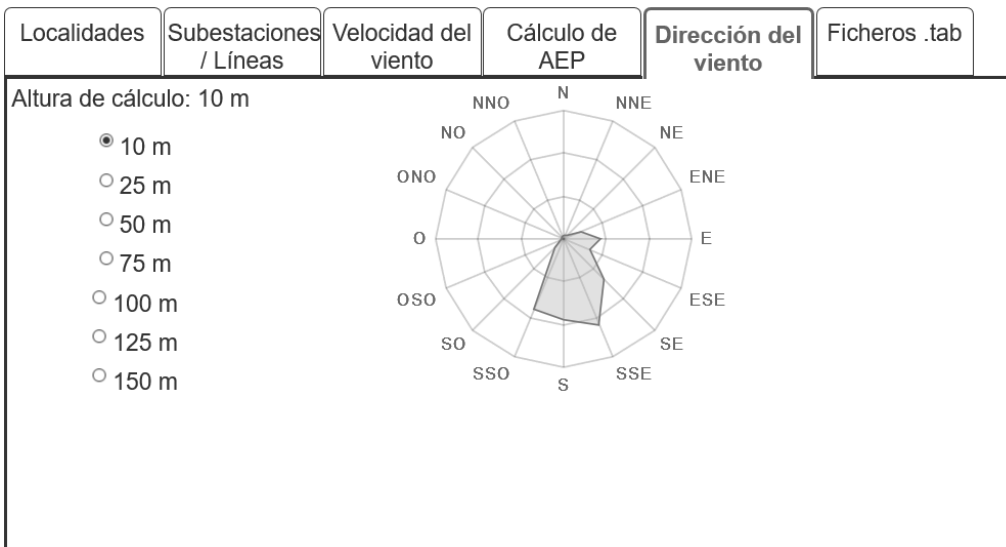


Figura 50. Dirección del viento en el Parque eólico proyectado.

Fuente (MINEM, 2019)



MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS
DIRECCION GENERAL DE ASUNTOS AMBIENTALES ENERGETICOS

El sistema de combustible para las turbinas de gas estará compuesto por un gaseoducto de 4 km de longitud y 0,25 m de diámetro, una unidad de control, medición y separación de condensados.

La central termoeléctrica ha previsto la construcción de una Subestación de 690 MVA que incluye 03 transformadores trifásicos de 230 MVA c/u, pórticos metálicos, sistemas de protección como interruptores, seccionadores, pararrayos, transformadores de tensión y corriente y celdas de salida en 220 kV

Se ha previsto un ingreso de las líneas L-207 y L-208 de 220 kV al sistema de barras proyectado en el patio de llaves de la central y luego tener cinco (05) salidas adicionales para empalmar con las actuales líneas, completando las ternas faltantes de las líneas existentes y así mismo se ha previsto una salida de simple terna a una futura subestación de Luz del Sur ubicada en las cercanías de la planta térmica.

Construcción de vías de acceso, campamentos y oficinas.

Para una producción de 520 MW se cuenta con la siguiente información

- Flujo requerido de Gas Natural (GN) 3 270 000 pie³/h
- Peso del GN estimado en 0 768 kg/m³
- Flujo en peso de GN 19 35 kg/s.
- Cálculo del aire necesario (estequiométrico) 16 72 kg de aire/kg de GN
- Formación de CO₂. 2 76 kg de CO₂/kg de GN
- Cantidad de CO₂. 2.76 x 19 35 = 53 406 kg de CO₂/s.
- Formación de H₂O· 2 11 kg de H₂O/kg de GN
- Cantidad de H₂O 2.11 x 19 35 = 40 83 kg de H₂O/s
- Formación NO_x: 0 083 kg de NO_x/kg de GN (sin tratamiento)
- Cantidad de NO_x: 0 083x19 35 = 1 606 kg de NO_x/s
- Formación de CO 0 021 kg de CO/kg de GN (sin tratamiento)
- Cantidad de CO· 0 021 x 19.35 = 0 406 kg de CO/s.
- Cantidad de contaminantes (CO₂ + CO + NO_x) = 55 418 kg/s.
- Operación de la Planta 7500 horas/año (27 000 000 segundos)
- Producción anual CO₂ = 1 442 000 TM/año, H₂O = 1 102 000 TM/año, NO_x = 43 360 TM/año (sin tratamiento) y CO = 10 962 TM/año (sin tratamiento)

EVALUACIÓN AL LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES DEL INFORME N° 065-2005-MEM-AAE/MU.

Observación N° 2 ABSUELTA

Los planos presentados en el EIA Central Termoeléctrica de Gas están debidamente firmados por el profesional que los elaboró, indicando su respectiva profesión y colegiatura.



PERÚ

Ministerio de Energía y Minas

EL PERÚ PRIMERO

1. RESUMEN NACIONAL DEL SECTOR ELÉCTRICO AL MES DE AGOSTO 2019

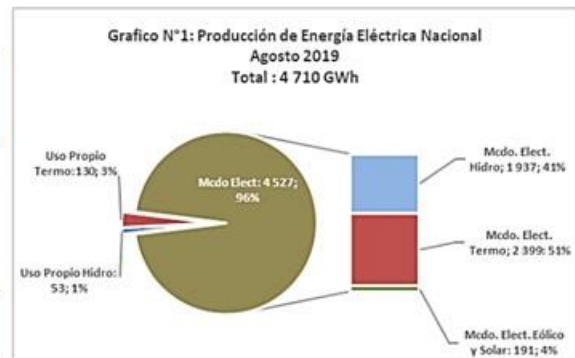
1.1. Producción de Energía Eléctrica

En el mes de agosto del presente año, se registró una producción total de energía eléctrica a nivel nacional, incluyendo a los Sistemas Aislados y SEIN, ascendió a 4 710 GW.h (ver cuadro N°1), 4,3% superior a similar mes del año 2018. Las unidades interconectadas al Sistema Eléctrico Interconectado Nacional – SEIN generaron 4 527 GW.h, 4,2% superior a la producción de agosto del año anterior. El 96,0 % del total nacional, es decir 4 527 GW.h, fue generado para el mercado eléctrico, y el 4% fue utilizado como generación de uso propio.

En cuanto al origen de la generación, las centrales hidroeléctricas a nivel nacional registraron una producción de 1 990 GWh, 4% menor respecto al mes de agosto del año anterior. Por su parte, la generación con recursos renovables eólico y solar, presentaron variaciones de -8% y 2% respectivamente, comparado con el valor registrado en igual mes de 2018. En relación a las centrales térmicas, su producción creció en 12,5%, de 2 248 GWh a 2 529 GW.h, valores del mes de agosto del año 2018 y 2019 respectivamente.

Cuadro N° 1: Producción de energía eléctrica nacional Según destino y fuente (GW.h).

Mercado Fuente	Mercado Eléctrico	Uso Propio	Total	Part.
Hidráulico	1 937	53	1 990	42%
Térmico	2 399	130	2 529	54%
Eólico	125		125	3%
Solar	66		66	1%
Total Nacional	4 527	183	4 710	
	96%	4%		



Cuadro N° 2: Producción de energía eléctrica nacional según mercado (GW.h)

Sistema	Agosto		Δ	Acumulado Enero a Agosto		Δ
	2018	2019		2018	2019	
SEIN	4 343	4 527	4,2%	34 614	36 222	4,6%
Mercado Eléctrico	4 223	4 402	4%	33 549	35 148	5%
COES *	76	84	10%	698	706	1,1%
No COES	44	41	-7%	367	368	0%
Uso Propio	173	184	6,3%	1 631	1 624	-0,4%
Aislados	42	42	-1%	345	350	2%
Mercado Eléctrico	131	142	9%	1 286	1 274	-1%
Uso Propio						
Total Nacional	4 516	4 710	4,3%	36 245	37 846	4,4%

(*): Información del Comité de Operación Económico del Sistema (COES)



Cuadro N° 3: Producción de energía eléctrica nacional según mercado y fuente (GW.h)

Destino:	Agosto		Δ	Acumulado Enero a Agosto		Δ
	2018	2019		2018	2019	
Mercado Eléctrico	4 341	4 527	4,3%	34 592	36 204	4,7%
Hidráulico	2 016	1 937	-4%	20 748	20 979	1%
Térmico	2 125	2 399	13%	12 470	13 683	10%
Eólico	135	125	-8%	929	1 078	16%
Solar	65	66	2%	445	465	4%
Uso Propio	175	183	4,5%	1 653	1 642	-0,7%
Hidráulico	52	53	2%	519	500	-4%
Térmico	123	130	6%	1 134	1 142	1%
Total Nacional	4 516	4 710	4,3%	36 245	37 846	4,4%

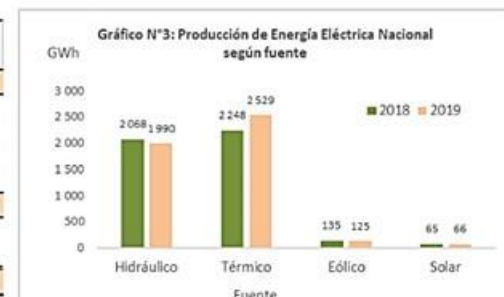


Figura 52. Principales indicadores del sector eléctrico a nivel nacional-setiembre 2019



PERÚ

Ministerio de Energía y Minas

EL PERÚ PRIMERO

2. GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA SEGÚN RECURSO ENERGÉTICO

2.1. Producción de energía eléctrica por tipo de recurso al mes de agosto 2019

Según el recurso energético utilizado por las centrales, el registro de la producción nacional en el mes de agosto tuvo la siguiente distribución: las unidades hidroeléctricas, 1 990 GW.h que significó 4 % inferior a similar mes del año 2018; las unidades a gas natural produjeron 2 264 GW.h, aumentó 8 % respecto al valor registrado en agosto del año anterior.

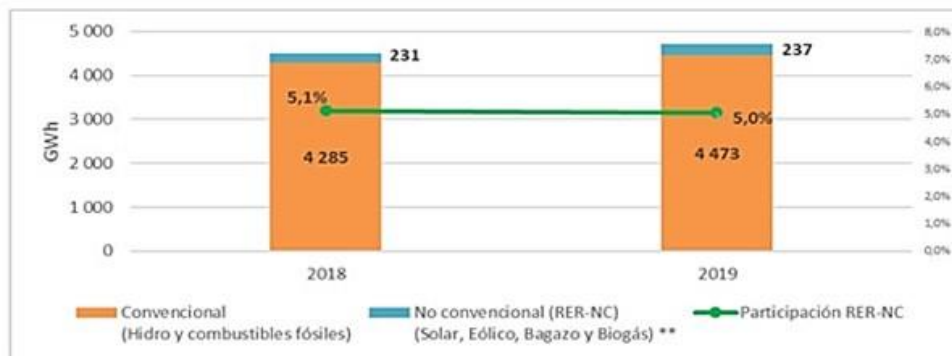
Por el lado de la generación con Recursos Energéticos Renovables No Convencionales (energía solar, eólica, bagazo y biogás)**, se generó 237 GW.h (incluye generación de sistemas aislados), valor que representó el 5 % de la producción nacional de agosto del presente año, y a su vez significó un incremento de 3 % respecto a agosto 2018 (ver Cuadro N°4).



Cuadro N° 4: Producción de energía eléctrica nacional Según recurso energético utilizado (GW.h)

Recurso energético	Agosto		Δ	Acumulado Enero a Agosto		Δ
	2018	2019		2018	2019	
Agua	2 068	1 990	-4%	21 267	21 479	1%
Gas Natural	2 088	2 264	8%	12 296	13 315	8%
Diesel/Carbón/ Residual	128	218	71%	1 061	1 158	9%
Bagazo / Biogás	31	46	51%	245	349	43%
Eólica	135	125	-8%	929	1 078	16%
Solar	65	66	2%	445	465	4%
Vapor (Cogeneración)	0,41	0,38	-7%	2,53	3,03	20%
Total Nacional	4 516	4 710	4,3%	36 245	37 846	4,4%

Gráfico N° 5: Participación de la producción de energía según recurso utilizado en el mes de agosto



(**): Incluye información de Recursos Renovables No Convencionales de Aislados

Figura 53. Principales indicadores del sector eléctrico a nivel nacional –setiembre 2019

 **OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE**



Figura 54. Objetivos de Desarrollo sostenible (ONU)

Fuente: Recuperado de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

ANEXO 3. PLANOS

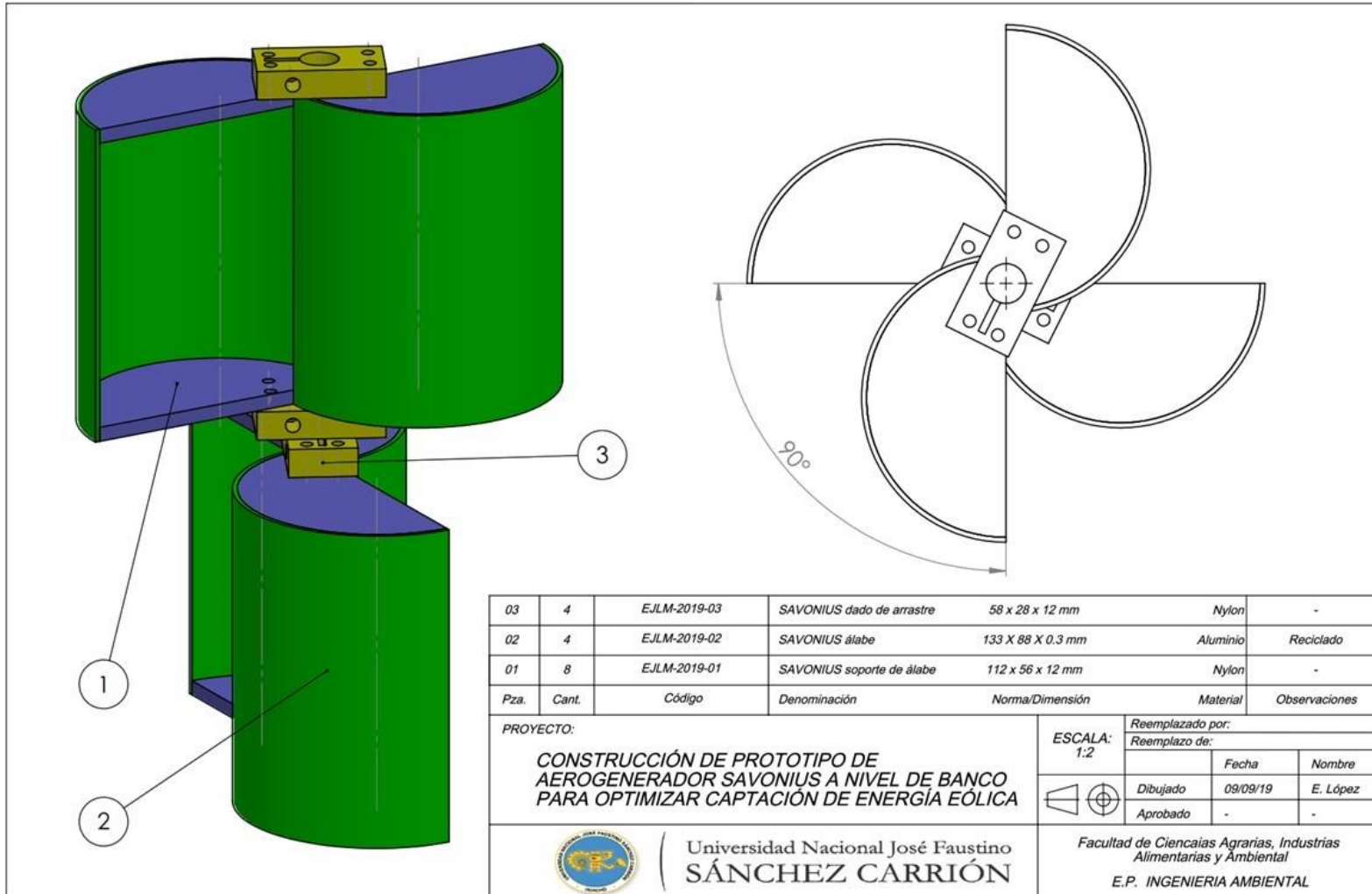
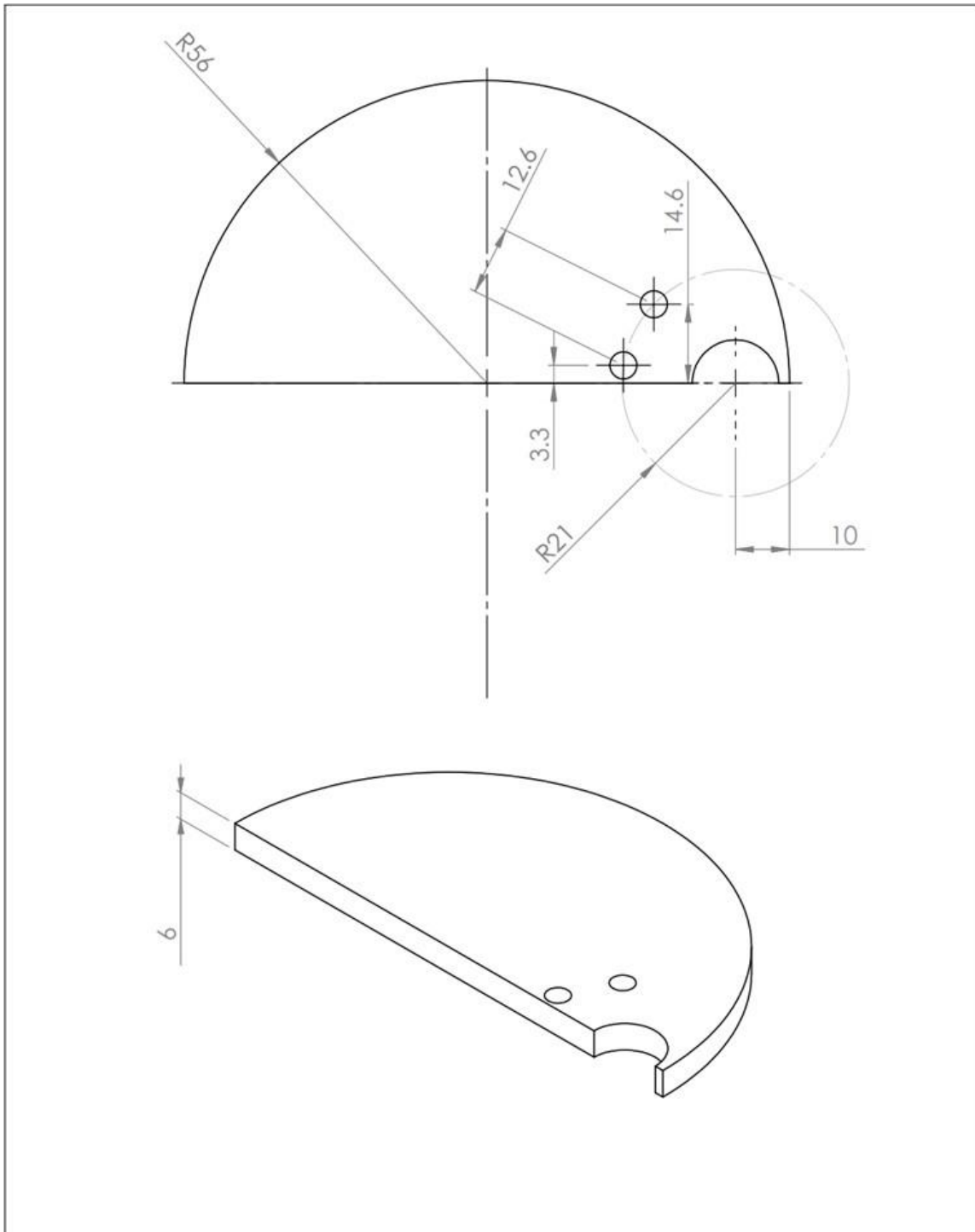
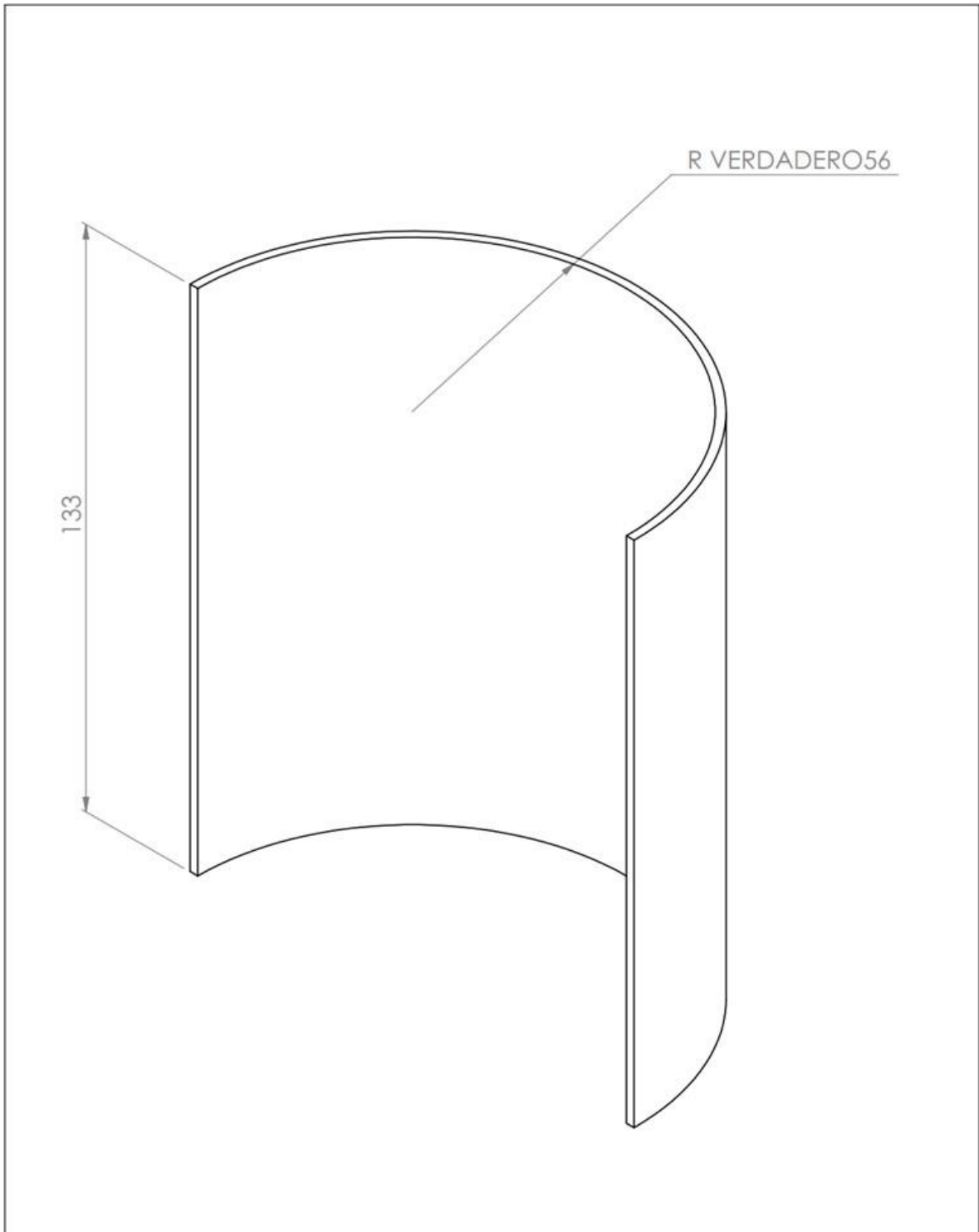


Figura 55. Plano de ensamble de turbina SAVONIUS clásico (modelo cero)



01	8	EJLM-SAV-2019-01	SAVONIUS soporte de alabe	112 x 56 x 12	Nylon	-
Pza.	Cant.	Código	Denominación	Norma/Dimensión	Material	Observaciones
PROYECTO: CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPO DE AEROGENERADOR SAVONIUS A NIVEL DE BANCO PARA OPTIMIZAR CAPTACIÓN DE ENERGÍA EÓLICA				ESCALA: 1:1	Reemplazado por: Reemplazo de:	Fecha Nombre
					Dibujado Aprobado	09/09/19 E. López - -
			Universidad Nacional José Faustino SÁNCHEZ CARRIÓN	Facultad de Ciencias Agrarias, Industrias Alimentarias y Ambiental E.P. INGENIERIA AMBIENTAL		

Figura 56. SAVONIUS soporte de álabes



02	4	EJLM-SAV-2019-02	SAVONIUS alabe	88 x 133 x 0.3	Aluminio	Reciclado
Pza.	Cant.	Código	Denominación	Norma/Dimensión	Material	Observaciones
PROYECTO: CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPO DE AEROGENERADOR SAVONIUS A NIVEL DE BANCO PARA OPTIMIZAR CAPTACIÓN DE ENERGÍA EÓLICA				ESCALA: 1:1	Reemplazado por: Reemplazo de:	
				Dibujado	09/09/19	E. López
				Aprobado	-	-
				Facultad de Ciencias Agrarias, Industrias Alimentarias y Ambiental E.P. INGENIERIA AMBIENTAL		

Figura 57. SAVONIUS álabe

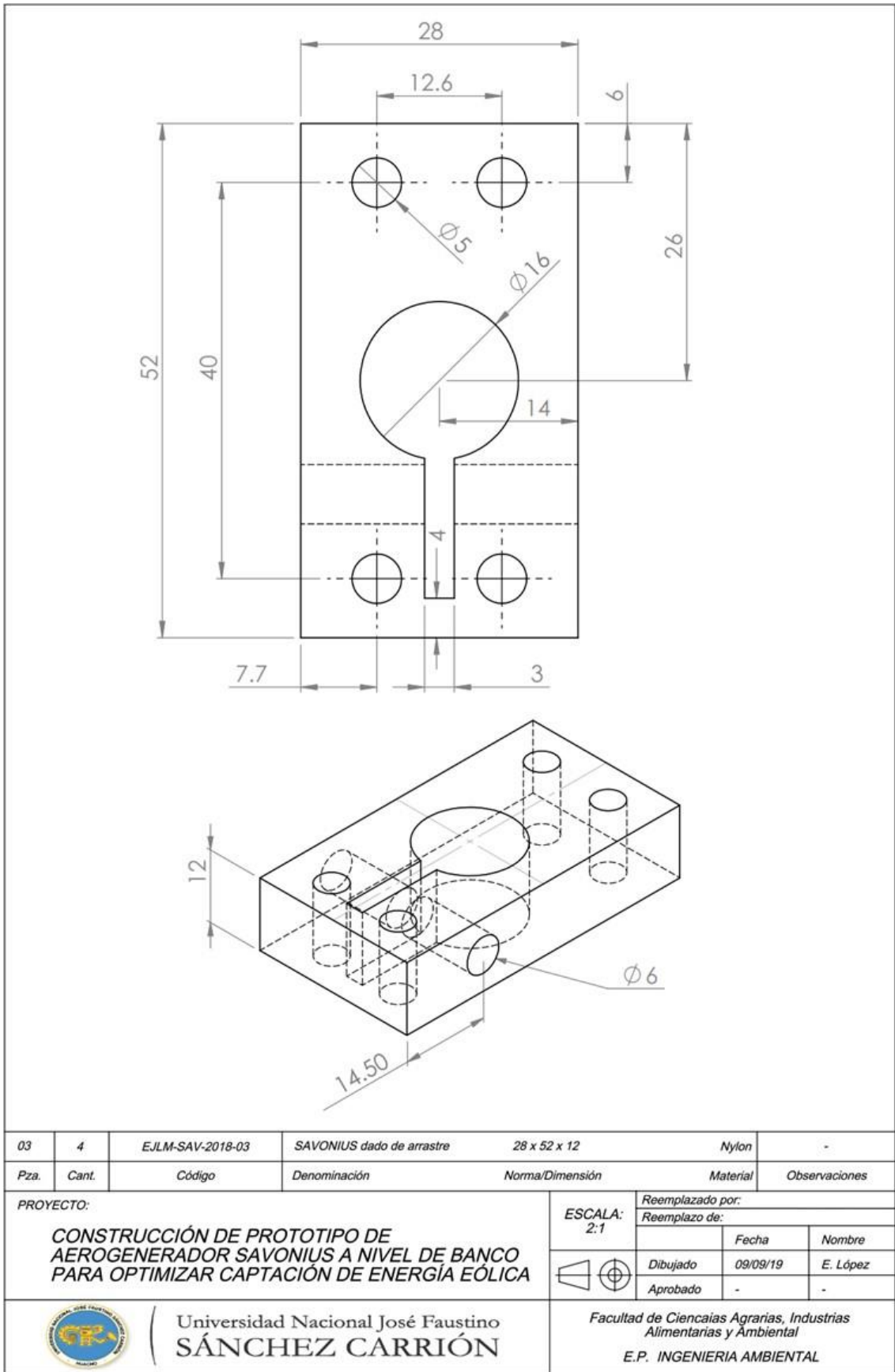


Figura 58. SAVONIUS dado de arrastre

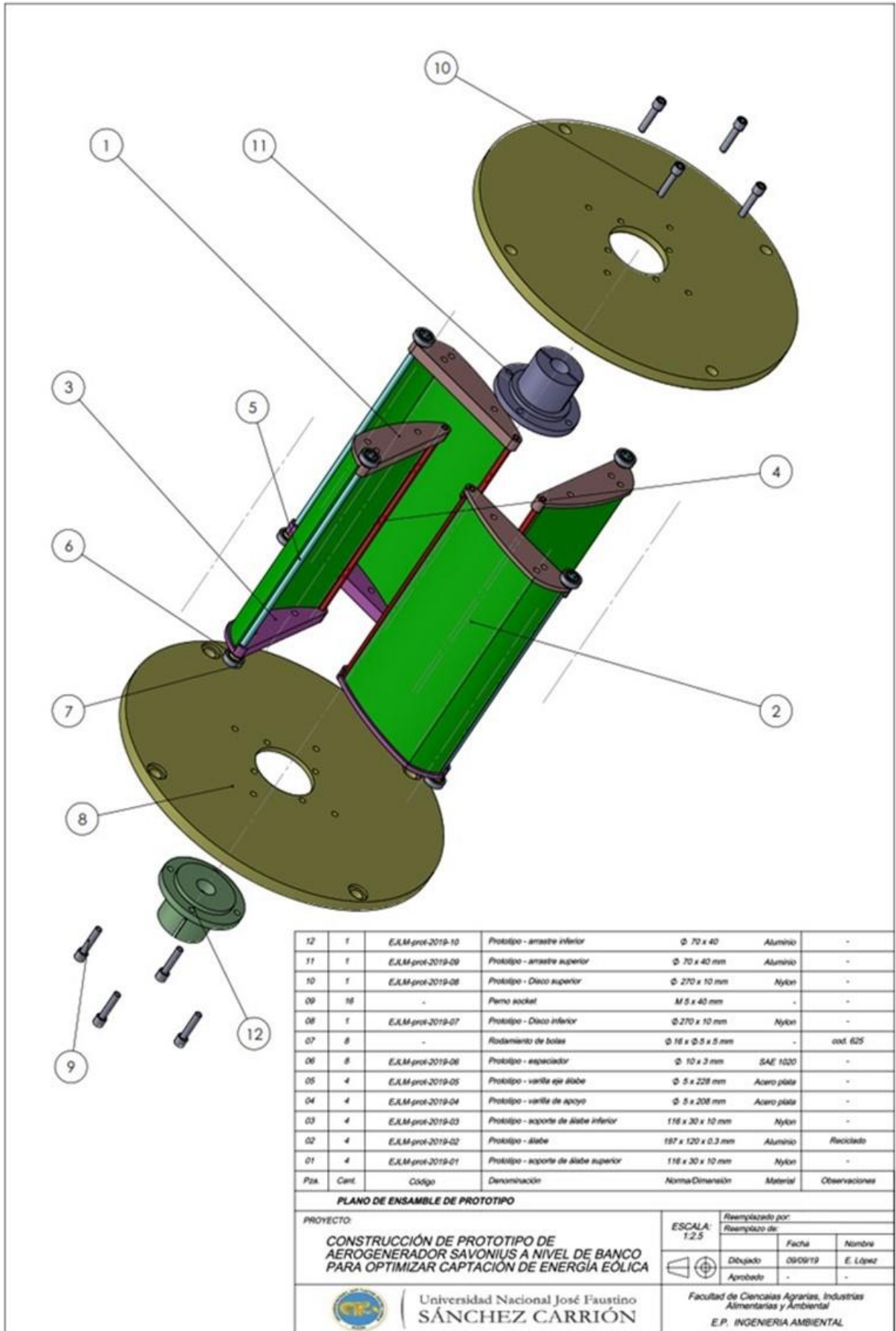
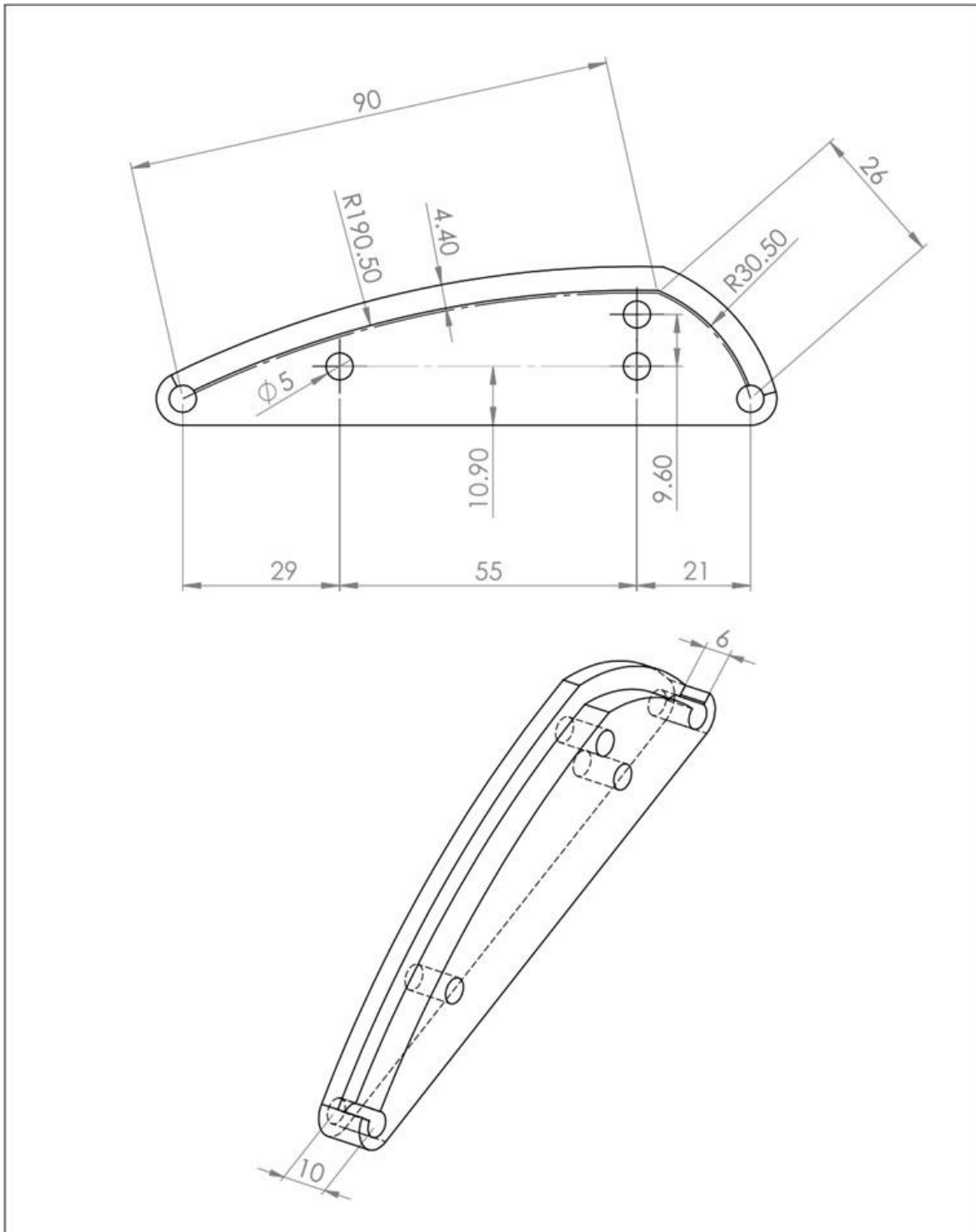
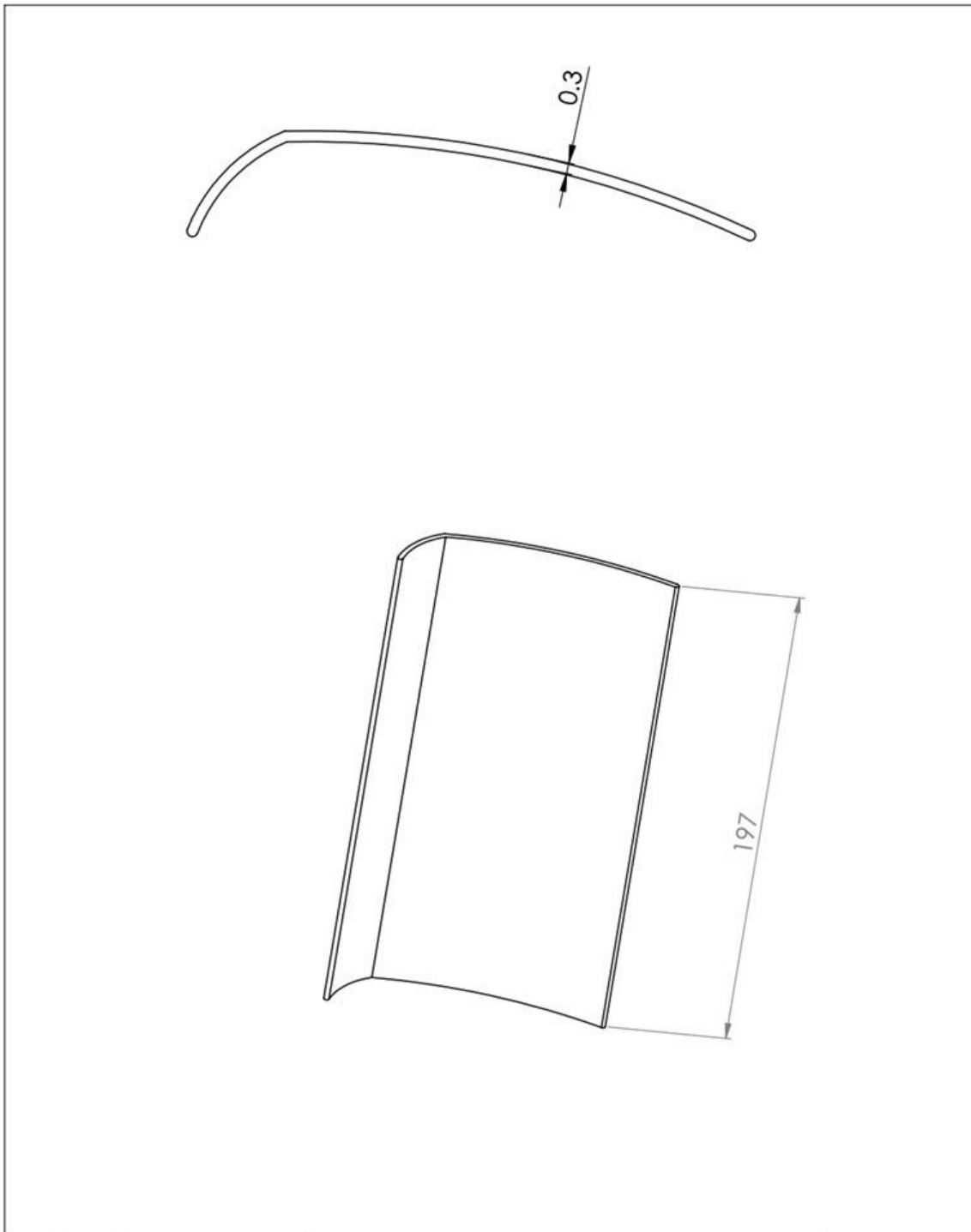


Figura 59. Plano de ensamble de PROTOTIPO



01	4	EJLM-prot-2019-01	Prototipo soporte de alabe superior	116 x 30 x 10 mm	Nylon	-
Pza.	Cant.	Código	Denominación	Norma/Dimensión	Material	Observaciones
PROYECTO: CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPO DE AEROGENERADOR SAVONIUS A NIVEL DE BANCO PARA OPTIMIZAR CAPTACIÓN DE ENERGÍA EÓLICA				ESCALA: 1:1	Reemplazado por: Reemplazo de:	
					Fecha	Nombre
					Dibujado	09/09/19
				Aprobado	Pza.	Pza.
				Facultad de Ciencias Agrarias, Industrias Alimentarias y Ambiental E.P. INGENIERIA AMBIENTAL		

Figura 60. PROTOTIPO soporte de álabes superior

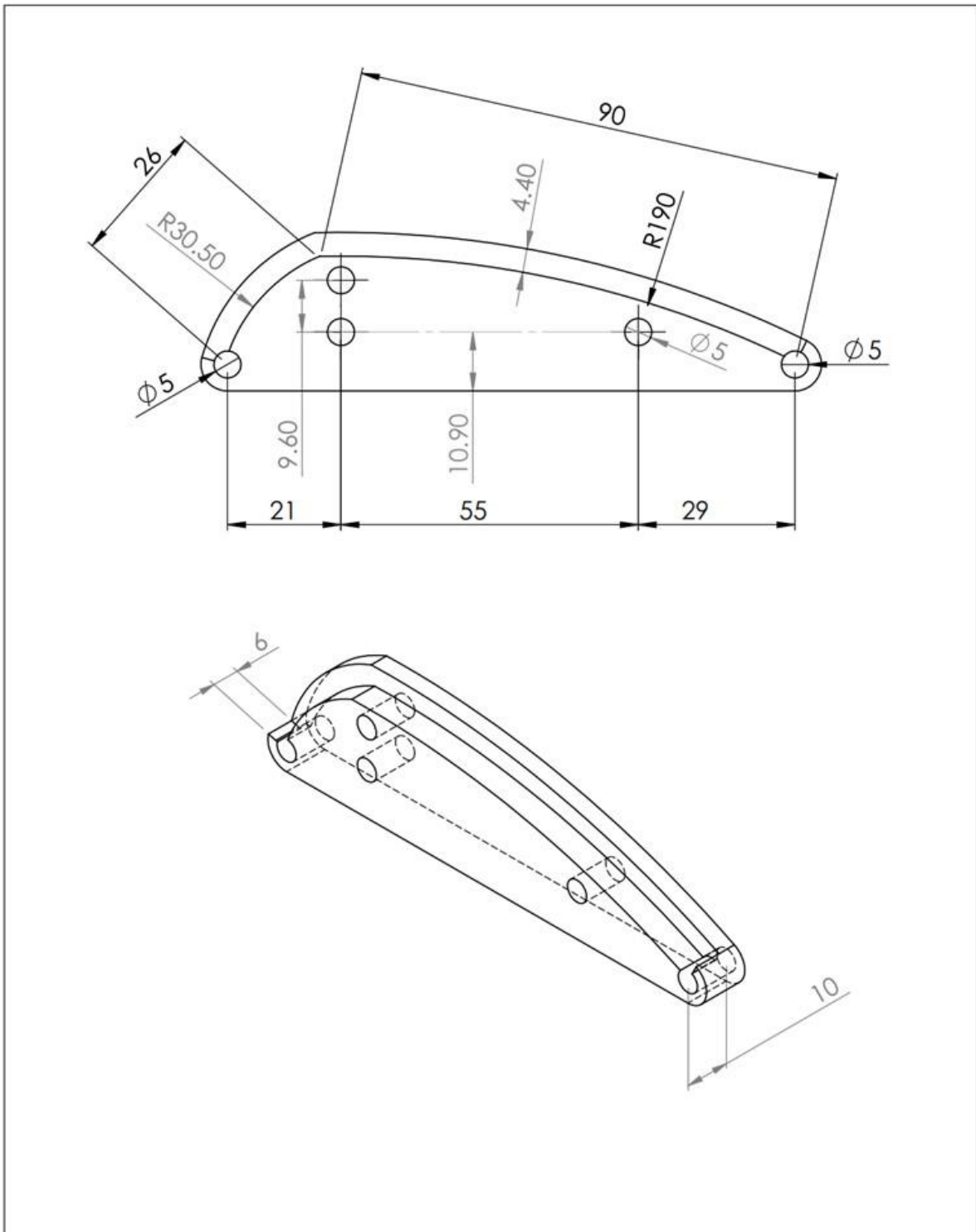


Pza.	Cant.	Código	Denominación	Norma/Dimensión	Material	Observaciones
02	4	EJLM-prot-2019-02	Prototipo Alabe	197 x 120 x 0.3 mm	Aluminio	reciclado

PROYECTO: CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPO DE AEROGENERADOR SAVONIUS A NIVEL DE BANCO PARA OPTIMIZAR CAPTACIÓN DE ENERGÍA EÓLICA	ESCALA: 1:1			Reemplazado por:	
				Reemplazo de:	
			Fecha	Nombre	
	Dibujado	09/09/19	E. López		
Aprobado	-	-			

	Universidad Nacional José Faustino SÁNCHEZ CARRIÓN	Facultad de Ciencias Agrarias, Industrias Alimentarias y Ambiental E.P. INGENIERIA AMBIENTAL
--	---	---

Figura 61. PROTOTIPO álabe





03	4	EJLM-prot-2019-03	Prototipo soporte de alabe inferior	116 x 30 x 10 mm	Nylon	-	
Pza.	Cant.	Código	Denominación	Norma/Dimensión	Material	Observaciones	
PROYECTO: CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPO DE AEROGENERADOR SAVONIUS A NIVEL DE BANCO PARA OPTIMIZAR CAPTACIÓN DE ENERGÍA EÓLICA				ESCALA: 1:1	Reemplazado por: Reemplazo de:		
 Universidad Nacional José Faustino SÁNCHEZ CARRIÓN					Dibujado	09/09/19	E. López
					Aprobado	-	-
				Facultad de Ciencias Agrarias, Industrias Alimentarias y Ambiental E.P. INGENIERIA AMBIENTAL			

Figura 62. PROTOTIPO soporte de álabes inferior

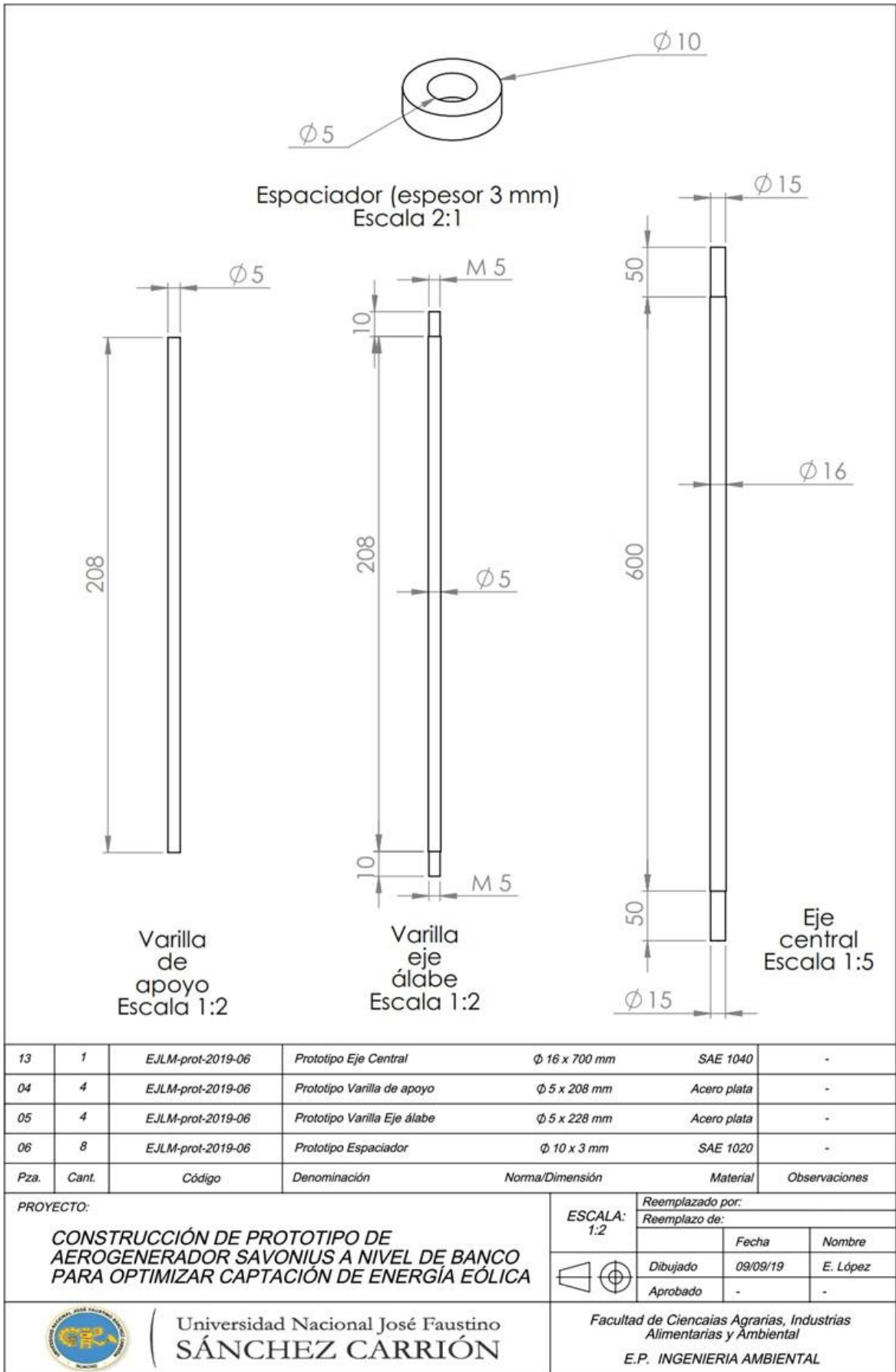


Figura 63. PROTOTIPO, varillas de soporte y eje central

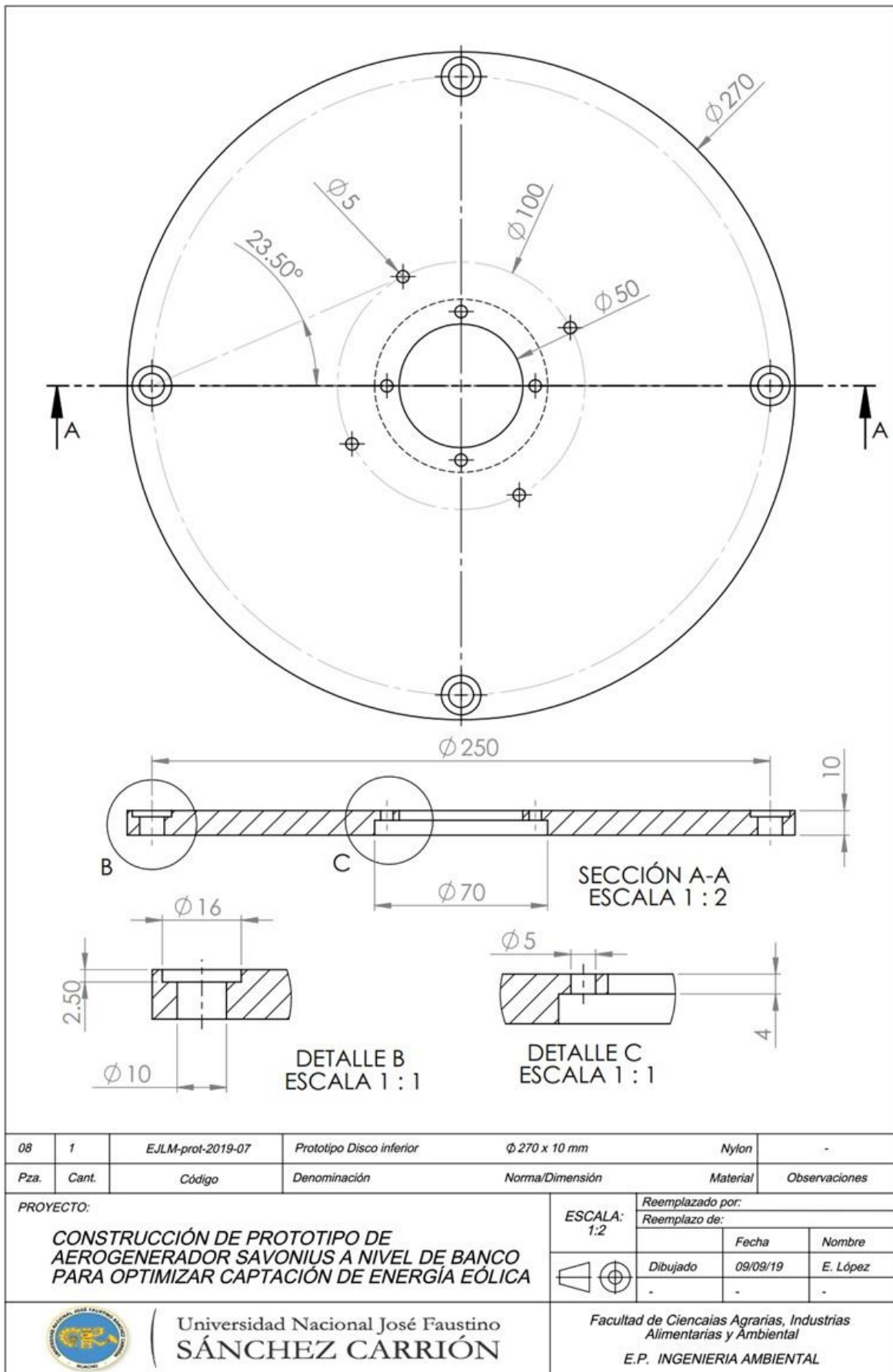


Figura 64. PROTOTIPO disco inferior

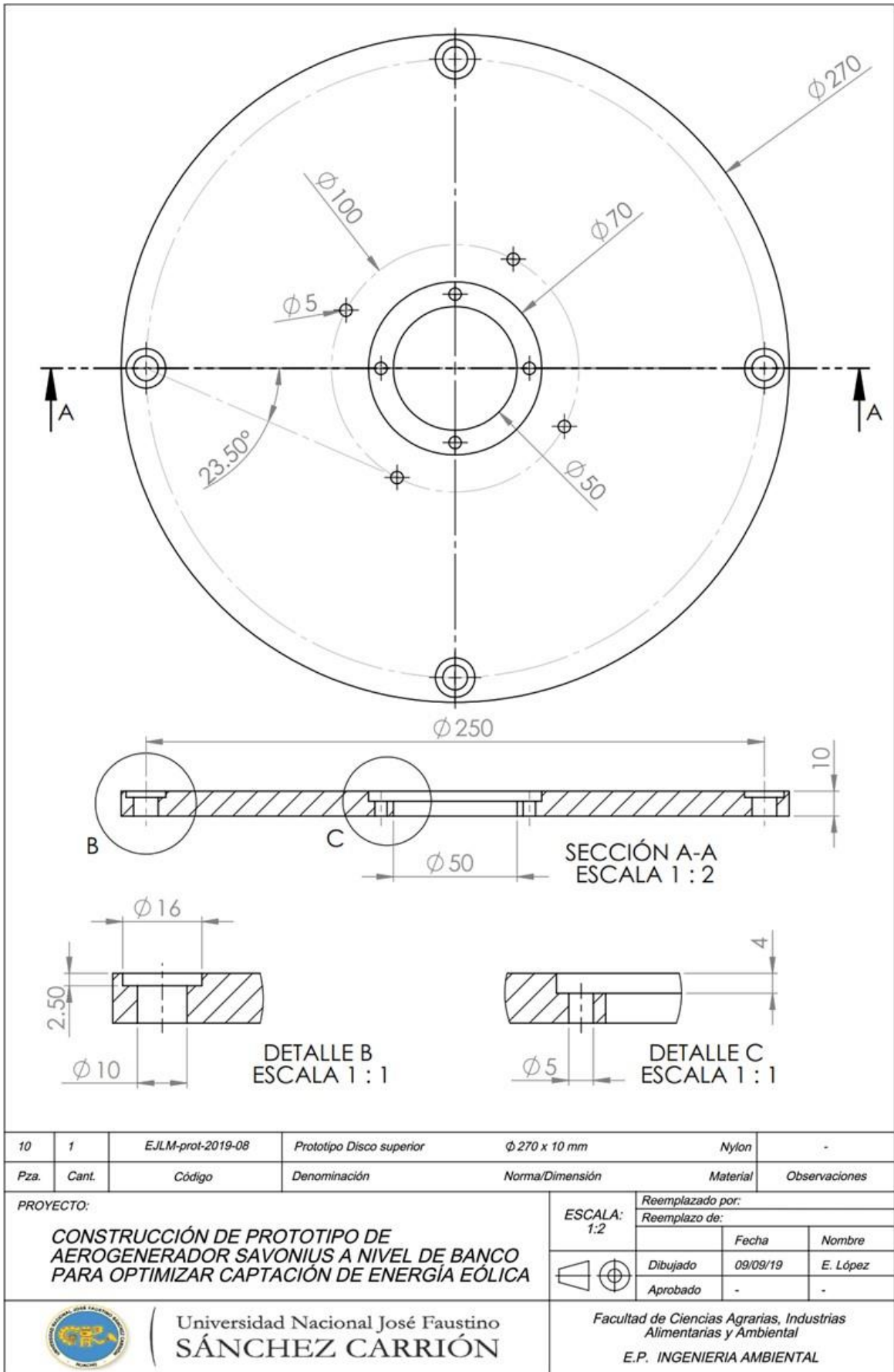
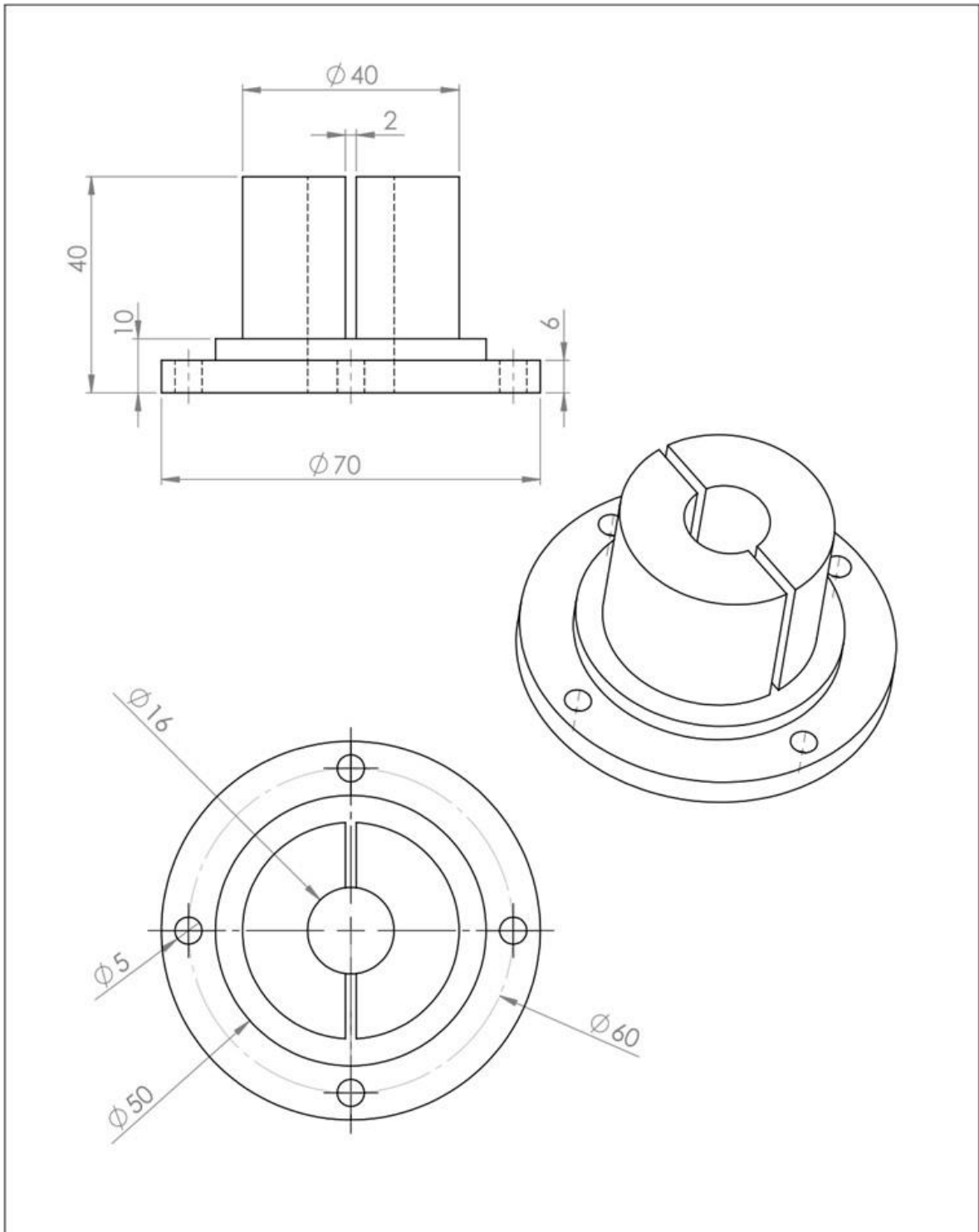
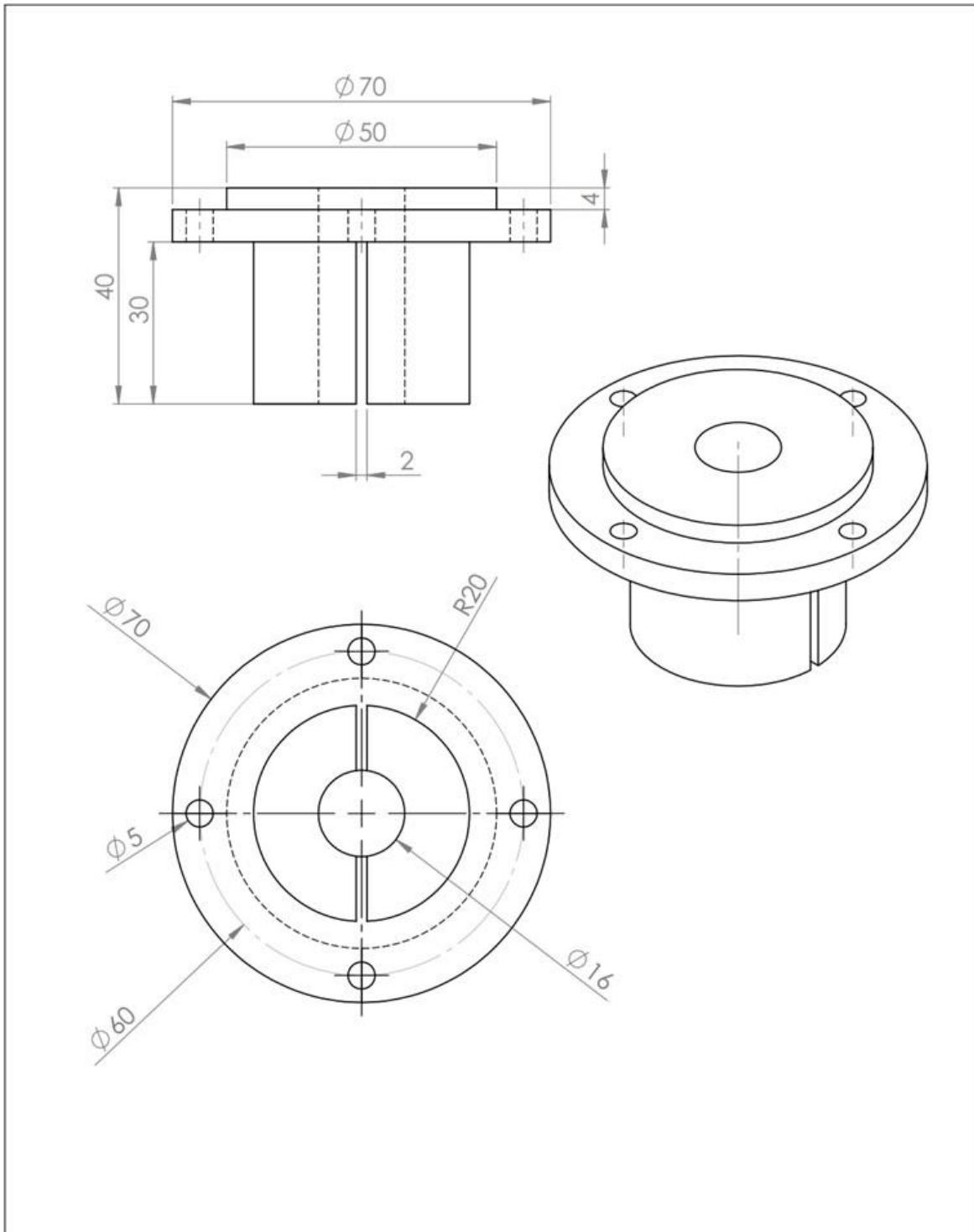


Figura 65. PROTOTIPO disco superior



11	1	EJLM-prot -2019-11	Prototipo Arrastre superior	Ø 70 x 40 mm	Aluminio	-
Pza.	Cant.	Código	Denominación	Norma/Dimensión	Material	Observaciones
PROYECTO: CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPO DE AEROGENERADOR SAVONIUS A NIVEL DE BANCO PARA OPTIMIZAR CAPTACIÓN DE ENERGÍA EÓLICA				ESCALA: 1:1	Reemplazado por: Reemplazo de:	
				Dibujado	09/09/19	E. López
				Aprobado	-	-
			Universidad Nacional José Faustino SÁNCHEZ CARRIÓN	Facultad de Ciencias Agrarias, Industrias Alimentarias y Ambiental E.P. INGENIERIA AMBIENTAL		

Figura 66. PROTOTIPO arrastre superior



12	1	EJLM-prot-2019-10	Prototipo Arrastre inferior	Ø 70 x 40 mm	Aluminio	-
Pza.	Cant.	Código	Denominación	Norma/Dimensión	Material	Observaciones
PROYECTO: CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPO DE AEROGENERADOR SAVONIUS A NIVEL DE BANCO PARA OPTIMIZAR CAPTACIÓN DE ENERGÍA EÓLICA				ESCALA: 1:1	Reemplazado por: Reemplazo de:	
					Fecha 09/09/19	Nombre E. López
				Aprobado	-	-
Universidad Nacional José Faustino SÁNCHEZ CARRIÓN				Facultad de Ciencias Agrarias, Industrias Alimentarias y Ambiental E.P. INGENIERIA AMBIENTAL		

Figura 67. PROTOTIPO arrastre inferior