



AEROGENERADORES DE FLUJO AXIAL E IMÁN PERMANENTE PARA SECTORES RURALES



Autores:
Pablo Aguilar Marín
Luis Julca Verástegui
Luis Alfaro García
Mario Chavez Bacilio

AEROGENERADORES DE FLUJO AXIAL E IMÁN PERMANENTE PARA SECTORES RURALES

Autores:

**Pablo Aguilar Marín
Luis Julca Verástegui
Luis Alfaro García
Mario Chavez Bacilio**



**UNIVERSIDAD NACIONAL
DE TRUJILLO**

© **AEROGENERADORES DE FLUJO AXIAL
E IMÁN PERMANENTE PARA SECTORES RURALES**

Autores:

Pablo Aguilar Marín
Luis Julca Verástegui
Luis Alfaro García
Mario Chavez Bacilio

Primera edición mayo del 2023
100 Ejemplares

Hecho el Depósito Legal en la Biblioteca
Nacional del Perú N° 2023-04109
ISBN:

Editorial:



Fondo Editorial Universitario
de la Universidad Nacional de Trujillo
Jr. Diego de Almagro N° 344 Trujillo - La Libertad
Jr. Independencia N° 389 Trujillo - La Libertad
edunt@unitru.edu.pe / edunt@gmail.com

Se terminó su impresión en mayo del 2023 en
Unidad de Impresiones de la Universidad Nacional de Trujillo
Jr. Diego de Almagro N° 344 Trujillo - La Libertad
Jr. Independencia N° 389 Trujillo - La Libertad

Impreso en Perú

Todos los Derechos Reservados.
Bajo las sanciones establecidas en el ordenamiento jurídico,
queda rigurosamente prohibida, sin autorización escrita de los
editores y el autor, la reproducción total o parcial de esta obra
por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía
y el tratamiento informático.

El contenido de este libro fue validado a
través de un proceso de evaluación de
Pares Externos.

INDICE

AGRADECIMIENTO	5
PRÓLOGO	7
CAPÍTULO 1.	9
INTRODUCCIÓN	9
CAPÍTULO 2.	13
NATURALEZA Y PROPIEDADES DEL VIENTO	13
2.1 Densidad y viscosidad del aire: número de Reynolds	13
2.2 Circulación global de aire: patrones de flujo de viento	15
2.3 Vientos locales	19
Turbulencia	20
2.4 Naturaleza y distribución de velocidades del viento	21
CAPÍTULO 3.	33
AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL DE PEQUEÑA ESCALA: PRINCIPALES COMPONENTES	33
3.1 El álabe: aspectos geométrico-dinámicos	37
Potencia límite de Betz	48
3.2. Disco rotor de imanes de neodimio y su fabricación	62
3.3 El estator trifásico y su fabricación	66
3.4 Sistema de baterías e inversores	70
3.5 Sistema de control electrónico	74
3.6 La torre del aerogenerador y su instalación	78
Selección de lugares y evaluación del potencial eólico	80
CAPÍTULO 4.	83
INSTALACIÓN DE AEROGENERADORES	83
4.1 Instalación de aerogenerador en Cushuro-Huamachuco	83
4.2 Instalación de aerogenerador en la subse de la UNT- Pacasmayo	89
4.3 Instalación de aerogenerador en la ciudadela “Muchik” de San Pedro de Lloc, Pacasmayo	103
4.4 Instalación de aerogenerador en la I.E. N° 80880 “Consuelo Solano de Villón” de San Pedro de Lloc	110
CONCLUSIONES	117
RECOMENDACIONES	119
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121

ANEXO A	125
ANEXO B.....	127
ANEXO C.....	130
DIVERSOS COMPONENTES ESTRUCTURALES	130
ANEXO D	137
ANEXO E.....	140
ANEXO F.....	141
PROYECTO:.....	141

AGRADECIMIENTO

La Universidad Nacional de Trujillo (UNT), Perú, durante las dos últimas décadas, ha venido organizando concursos de proyectos de investigación científica financiados con fondos provenientes del canon minero de la región “La Libertad,” transferidos a la Universidad Nacional de Trujillo (UNT).

Los autores agradecemos el financiamiento concedido, vía concurso, para la ejecución del proyecto: “Desarrollo de aerogeneradores tipo flujo axial e imán permanente para sectores rurales de “la Libertad,” primera etapa.”

Agradecemos también a la organización internacional, WINDAID por el asesoramiento y servicio técnico durante la ejecución del proyecto. WINDAID opera con técnicos e ingenieros especialistas, estudiantes y profesionales voluntarios extranjeros que suelen visitar Trujillo con la finalidad de participar en la fabricación de aerogeneradores. Como resultado de este intercambio cultural y científico, se estableció una relación de cooperación, en calidad de socios, entre la UNT y la Universidad de Estados Unidos de Norte América, “Northampton Community College” para participar en un concurso del programa “La Fuerza de los 100,000 en las Américas” (“100,000 Strong in the Americas”), una iniciativa del expresidente, Barack Obama, que promueve el intercambio académico entre universidades de Norteamérica y de Latinoamérica. En el referido concurso se ganó con el proyecto “Implementing Sustainable Energy Systems in Developing Communities” (Implementación de Sistemas de Energía en Comunidades en Desarrollo) (ver Anexos E y F) motivo por el cual, se firmó un Memorándum de Entendimiento entre la UNT y la universidad “Northampton Community College.” En las actividades culturales del proyecto también participaron docentes de la Facultad de Ciencias Sociales de la UNT.

Así mismo, estudiantes de las escuelas de Física y de Ingeniería mecánica e Ingeniería Mecatrónica, de la sede central y de la subsele del valle de Jequetepeque de la UNT, fueron entrenados y participaron en la fabricación e instalación de los aerogeneradores. Nuestro agradecimiento a todos ellos.

La contribución financiera y de gestión, de la Sra. Gladys Mabel García Paredes, Ministerio de Relaciones Exteriores del Perú, hizo posible la edición del presente libro.

PRÓLOGO

El presente libro ha sido preparado en base al contenido del *informe de cierre* del proyecto de investigación “**Desarrollo de aerogeneradores tipo flujo axial e imán permanente para sectores rurales de “La Libertad, primera etapa”**” (Aguilar et al., 2018) presentado por los autores ante el Vice-Rectorado de Investigación de la UNT (Oficina de Investigación y Ética). Damos así, cumplimiento a uno de los compromisos contraído por los autores ante la UNT.

El principal objetivo de un *aerogenerador* (turbina de viento) es la extracción de energía cinética del viento. En un aerogenerador, un conjunto de *álabes* (paletas) conectado a un eje de rotación, es ubicado en una corriente de aire transformando la energía cinética del viento en energía de rotación de los álabes. Esta energía de rotación se transforma luego, mediante el fenómeno de inducción electromagnética de Faraday, en energía eléctrica la misma que puede ser utilizada directamente al conectarse a una red eléctrica (aerogeneradores de gran escala), o almacenada en baterías (aerogeneradores de pequeña escala). En el tipo de aerogenerador de eje horizontal de pequeña escala del presente estudio, el flujo electromagnético necesario, es creado por un conjunto de imanes permanentes.

El aerogenerador, tipificado como de pequeña escala del tipo flujo magnético axial e imán permanente, fue desarrollado por la necesidad de contar con una máquina económica, de arranque directo, confiable y simple de fabricar. El *rotor* del aerogenerador del tipo diseñado por Piggot (2010), consiste de dos discos de acero cada uno con imanes permanentes localizados alrededor de la periferia de cada disco. Los componentes principales son: i) tres álabes, ii) un rotor, iii) un estator constituido de bobinas de alambre conductor de cobre, iv) un banco de baterías.

Los álabes fueron fabricados con fibras de carbono y de vidrio, espuma de poliuretano y con un perfil aerodinámico correspondiente al estándar NACA 4412. Los dos discos que conforman el rotor fueron fabricados con acero estructural ASTM A 36. En una de las caras de cada disco rotor se ubicaron 24 piezas de imán de neodimio. El *estator* consistió de 18 arrollamientos de alambre de cobre conductor eléctrico AWG 12 (bobinas) embebidos en resina polimérica formando un disco.

Los dos discos del rotor fueron montados a lo largo de un eje horizontal con el disco estator en el centro de modo que el flujo magnético producido por los imanes atravesase el área de las bobinas del estator.

Con el rotor conectado a los álabes en rotación por acción del viento, en las bobinas del estator se induce electromagnéticamente un voltaje eléctrico alterno debido al flujo magnético (variable con el tiempo) de los imanes del rotor. De esta manera, se convierte la energía cinética del viento en voltaje eléctrico alterno que luego se convierte a voltaje continuo y se almacena en un banco de baterías.

Durante la ejecución del proyecto se diseñó, construyó e instaló en zonas rurales de la región La Libertad, Perú, 04 aerogeneradores del tipo eje horizontal y flujo magnético axial producido por imanes permanentes de neodimio (de fórmula química, $Nd_2Fe_{14}B$). Los aerogeneradores construidos fueron instalados en los siguientes

lugares: 1) Institución Educativa N° 80897 de la Junta Vecinal del caserío de Cushuro, Huamachuco, La Libertad, 2) zona rural de Pacasmayo (local de la sub sede de la Universidad Nacional de Trujillo), La Libertad, 3) local de la ciudadela “Gran Muchik”, Comunidad de San Pedro de Lloc, La Libertad, 4) Institución Educativa N° 80880 “Consuelo Solano de Villón” de San Pedro de Lloc, La Libertad. En la ejecución del proyecto en referencia, se formalizó una sociedad con la universidad “Northampton Community College” de USA a través del proyecto “Implementing Sustainable Energy Systems in Developing Communities” (Implementación de Sistemas de Energía en Comunidades en Desarrollo) el mismo que fue aprobado por el Departamento de Estado-USA, dentro de su programa “La Fuerza de los 100,000 en las Américas” (100,000 Strong in the Americas).

Esta publicación se divide en cuatro capítulos principales, las conclusiones y recomendaciones, referencias bibliográficas y anexos. El primer capítulo contiene la *introducción*. En el segundo capítulo se describe el origen y las características del viento generado por diferencias de temperatura y presión alrededor del globo terráqueo, la distribución local de velocidades del viento así como su dependencia con la altitud. Se presentan datos de velocidades del viento y se describe los métodos de análisis estadístico de datos. El tercer capítulo trata de las características geométricas y fabricación de los principales componentes (álabes, rotor, estator) del aerogenerador de pequeña escala de eje horizontal, con flujo magnético axial e imán de neodimio. Se desarrolla los aspectos teóricos de la interacción entre álabe y el viento, el proceso de almacenamiento de la energía eléctrica generada en bancos de baterías y el sistema de control electrónico de la energía. El cuarto capítulo está dedicado a la instalación de los aerogeneradores construidos en sectores rurales de la región La Libertad, Perú. En los anexos se incluyen algunas características del diseño de los componentes del aerogenerador e información sobre la difusión al público de las actividades de ejecución del proyecto.

La ejecución del proyecto generó el desarrollo de varias tesis de pre-grado y maestría por estudiantes de Ingeniería Mecatrónica y de Física de la UNT y por una docente de Física de la Universidad Nacional de Piura (Arrunátegui, 2019). Estas tesis se llevaron a cabo bajo nuestro asesoramiento.

El libro ha sido escrito con la intención de difundir de manera didáctica los aspectos teóricos de los fenómenos físicos involucrados en el funcionamiento de un aerogenerador a un nivel universitario de pre-grado y de hacer conocer los procedimientos de fabricación de los diversos componentes de manera reproducible. Los materiales a utilizar son de fácil adquisición en el mercado local. Los imanes de neodimio se pueden importar fácilmente vía internet. El libro puede utilizarse en cursos sobre fluidos en ingeniería mecánica y física, tanto en la parte teórica como práctica.

LOS AUTORES