



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE INGENIERÍA

TESIS

Turbina de eje vertical Darrieus tipo H para un sistema de
Generación distribuida para una casa-habitación en el Estado de
Puebla

Para obtener el título de
LICENCIADO EN INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

PRESENTA:

MIGUEL ALEJANDRO GARCÍA HERNÁNDEZ

Firma

ASESOR:

DR. MARCO ANTONIO CRUZ GOMEZ

ATENTAMENTE

Dr. Cruz Gómez Marco Antonio
Académico Facultad de Ingeniería
Núm. de Trabajador 100301922
mangacruz@live.com
Cel. 22 23 83 66 74

Firma

CO ASESOR:

MTRO. GENARO ROBERTO LÓPEZ AGUILAR

Firma

VOCAL:

MTRA. NUBIA SAAVEDRA CRUZ

Firma:



BUAP

“HUP, 50 años de enseñanza y salud”

Oficio No. SAC/2385/2022

**C. Miguel Alejandro García Hernández, -201621055-
Pasante de la Licenciatura en Ingeniería
Mecánica y Eléctrica
Presente.**

En atención al Tema de Tesis que puso Usted a consideración de la Coordinación de Área y de esta Secretaría Académica en coordinación con la Dirección de ésta Facultad de Ingeniería, dentro del marco de Titulación por Examen Profesional, como medio de Titulación se dio revisión y se ha autorizado el tema denominado:

“TURBINA DE EJE VERTICAL DARRIEUS TIPO H PARA UN SISTEMA DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA PARA UNA CASA-HABITACIÓN EN EL ESTADO DE PUEBLA”

Por lo anterior hago de su conocimiento que se asigna como Asesor de tema al Dr. Marco Antonio Cruz Gómez y como Co Asesor al Mtro. Genaro Roberto López Aguilar.

Sin más por el momento, le envío la seguridad de mi consideración más distinguida.

Atentamente
“Pensar bien para vivir mejor”
H. Puebla de Z. a 13 de diciembre de 2022

M. I. Angel Cecilio Guerrero Zamora
Director



M'ACGZ/M'VGL/barv
C.c.p. Archivo

M. I. Angel Cecilio Guerrero Zamora
Director de la Facultad de Ingeniería
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
P r e s e n t e.

El que suscribe: Dr. Marco Antonio Cruz Gómez, asesor del tema de tesis:

“TURBINA DE EJE VERTICAL DARRIEUS TIPO H PARA UN SISTEMA DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA PARA UNA CASA-HABITACIÓN EN EL ESTADO DE PUEBLA”

Presentada por el C. Miguel Alejandro García Hernández -201621055-, pasante del Colegio de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, y en atención al oficio No. SAC/2385/2022 con fecha de emisión 13 de diciembre de 2022, me permito informar a Usted que después de haber revisado cuidadosamente el contenido temático, metodología, redacción y ortografía de la tesis correspondiente, no tengo inconveniente en autorizar la impresión del mismo.

Sin otro particular, le reitero la seguridad de mi más atenta y distinguida consideración.

A t e n t a m e n t e
“Pensar bien, para vivir mejor”
H. Puebla de Z. a de 09 de febrero de 2023

ATENTAMENTE



Dr. Cruz Gómez Marco Antonio
Académico Facultad de Ingeniería
Núm. de Trabajador 100301922
mangcruz@live.com
Cel. 22 23 83 66 74

Dr. Marco Antonio Cruz Gómez
Asesor de Tema

M'CRIB/BARV
C.c.p. Archivo

Agradecimientos

Quiero agradecer a mis padres y mi hermana, son las primeras personas que confiaron en mí y de lo que era capaz, no estaría aquí sino fuese por su constante amor, impulsándome a ser el mejor ingeniero y persona que pueda ser.

También quiero extender un agradecimiento a todo el grupo de Generación de Energías Sustentables del 2020 de la BUAP por toda la ayuda que me ofreció durante la realización de este proyecto; al Ing. David Morales Palomares por ayudarme con el diseño y elaboración de los planos realizados en este proyecto, a los Ingenieros Israel Patiño Anotzin y José R. Ruiz Contreras por su disposición a la hora de manufacturar y ensamblar los elementos de la turbina, y al Ing. Rolando Santiago Ortiz por compartir su ayuda y conocimientos para la instalación del sistema de Generación Distribuida. Un agradecimiento especial al Dr. Marco Antonio Cruz Gómez por abrirme las puertas de su departamento de investigación, al Mtro. Tomas Aarón Juárez Zerón por darme la confianza de utilizar su modelo como muestra de estudio para la investigación y a la Mtra. Nubia Saavedra Cruz por su asesoramiento a la hora de ponderar los datos para la simulación CFD. La ingeniería es un trabajo en equipo y me alegra haber contado con el mejor. Gracias por todo.

Índice

Resumen	5
Abstract	6
Introducción General	7
CAPITULO I. Proyecto de investigación	10
1.1 Introducción	10
1.2 Problemática	10
1.3 Objetivo general	11
1.4 Objetivos específicos	11
1.5 Justificación	12
1.6 Alcance	13
CAPITULO II. Antecedentes, contexto histórico y principios fundamentales	14
2.1 Introducción	14
2.2 Antecedentes	14
2.3 Turbinas eólicas	17
2.3.1 Alternador trifásico	18
2.3.2 Turbinas de Eje Horizontal	30
2.3.3 Turbinas de Eje Vertical	35
2.4 Capacidad de energía sustentable en México	44
2.4.1 Energía eólica en México	47
2.5 Generación Distribuida	48
2.5.1 Generación Distribuida en México	50
2.6 El Acuerdo de Paris	53
2.6.1 NDC de México hasta el 2021	54
CAPITULO III. Diseño CAD	57
3.1 Introducción	57
3.2 Análisis eólico del municipio de Puebla	57
3.3 Diseño del Modelo CAD	59
3.3.1 Perfil aerodinámico	59
3.3.2 Modelado de la turbina	60
3.3.3 Modelado del poste	64
CAPITULO IV. Análisis aerodinámico y CFD del Modelo CAD	66
4.1 Introducción	66

4.2 Estimaciones	66
4.3 Coeficiente de Momento (CM)	67
4.4 TSR (λ) y Coeficiente de Potencia (Cp)	68
4.5 Análisis CFD	70
4.5.1 Preparación del Modelo CAD y sus volúmenes de control.....	70
4.5.2 Mallado	71
4.5.3 Configuración de las condiciones de frontera	72
4.5.4 Interpretación y análisis de los resultados.....	73
CAPITULO V. Construcción de la turbina Darrieus Tipo H	76
5.1 Introducción	76
5.2 Manufactura y ensamble de los elementos de la turbina	76
5.3 Selección del tren de engranes y el alternador	78
CAPITULO VI. Resultados	80
6.1 Potencia eléctrica generada	80
6.2 Parámetros de la turbina	82
6.3 Recomendaciones	82
6.4 Discusión de Resultados	83
Conclusiones	88
Referencias	91

Resumen

La implementación de sistemas de generación sustentable satisfaciendo las demandas de la línea de potencia eléctrica ha comenzado a convertirse en una necesidad dadas las consecuencias climáticas adyacentes a los medios de obtención de energía mediante la quema de combustibles fósiles. Hoy en día, México cuenta con un 30.14% de medios sustentables instalados como generadores al Sistema Eléctrico de Potencia (SEP), pero únicamente como alimentadores secundarios dadas sus intermitencias.

En este proyecto de investigación se plantea un sistema de Generación Distribuida (GD) instalada en una residencia del Estado de Puebla, cuya alimentación sea dada por una turbina eólica de eje vertical Darrieus tipo H de cinco palas con una gran área de contacto.

Este sistema GD, además de ser capaz de satisfacer las cargas de la vivienda, lidia con dos grandes problemáticas del sector energético sustentable, las grandes áreas de ocupación y las turbulencias de las ciudades cerradas. Dadas las características de los aerogeneradores, su eficiencia media oscila alrededor del 25%, lo cual se compensa con la instalación de inmensos parques eólicos en zonas rurales, que arremeten estas ineficiencias de calidad eléctrica con cantidad; lo que evita que vuelva a crecer vegetación y desplace a la fauna de la zona permanentemente. La otra desventaja que se afrontó son las turbulencias del Valle de Puebla; que, anexadas a lo cerrado de la ciudad, complican la implementación de parques eólicos en el estado; lo hace adecuado el montaje de turbinas de eje vertical, que no necesitan ser direccionadas en la dirección del viento debido a su naturaleza mecánica.

En base a una metodología mixta, utilizando tanto tecnologías tanto cuantitativas como cualitativas, se diseñó una turbina eólica de eje vertical Darrieus tipo H con respecto a los parámetros psicrométricos del Estado de Puebla a 2153 msnm; que, a través de un sistema GD, aportara alimentación eléctrica siguiendo las normas NOM-081-SEMARNAT-1994 y NOM-001-SEDE-2005, cuyo comportamiento y eficiencia aerodinámica fue rectificadas a través de un análisis CFD en la herramienta FLUENT de ANSYS 2022 con el modelo matemático K-Épsilon.

Entre los resultados obtenidos, se observa una Relación de Velocidad de Punta media-alta con un buen comportamiento ante de turbulencias de los flujos de aire. Por lo cual, en el ámbito de sostenibilidad; sería un gran beneficio para zonas urbanas con vientos a altas velocidades, otorgándoles una alternativa de producción de energía asequible y amigable con el ambiente. En el área sustentable, la implementación de este diseño de turbina eólica comenzaría a generar una cultura comprometida con la integridad su entorno. También le permitiría a la sociedad mexicana participar de forma activa en el cumplimiento internacional del Acuerdo de París acerca del cambio climático y la reducción de las emisiones de carbono para el año 2050.

Palabras clave: *Turbina Darrieus, Generación Distribuida, sostenibilidad, turbulencias*

Abstract

The implementation of sustainable generation systems satisfying the demands of the electric power line has begun to become a necessity given the climatic consequences adjacent to the means of obtaining energy by burning fossil fuels. Nowadays, Mexico has 30.14% of sustainable means installed as generators to the Electric Power System, but only as secondary feeders due to their intermittency.

This research project proposes a Distributed Generation (DG) system installed in a residence in the State of Puebla, whose power supply is provided by a five-bladed Darrieus H-type vertical axis wind turbine with a large contact area.

This DG system, in addition to being able to meet loads of the house, deals with two major problems of the sustainable energy sector, the large areas of occupation and the turbulence of closed cities. Given the characteristics of wind turbines, their average efficiency oscillates around 25%, which is compensated for by the installation of huge wind farms in rural areas, which overcome these inefficiencies of electrical quality with quantity; this prevents vegetation from growing back and displacing the fauna of the area permanently. The other disadvantage that was faced is the turbulence of the Valley of Puebla, which, together with the closed nature of the city, complicates the implementation of wind farms in the state, making it suitable for the installation of vertical axis turbines, which do not need to be directed in the direction of the wind due to their mechanical nature.

Based on a mixed methodology, using both quantitative and qualitative technologies, a Darrieus H-type vertical axis wind turbine was designed concerning the psychometric parameters of the State of Puebla at 2135 masl; The behavior and aerodynamic efficiency of the turbine were rectified through a CFD analysis in the FLUENT tool of ANSYS 2022 with the K-Epsilon mathematical model.

Among the results obtained, a medium-high Tip Speed Ratio is observed with a good turbulence behavior of the air flows. Therefore, in the area of sustainability, it would be a great benefit for urban areas with high wind speeds, providing them with an affordable and environmentally friendly energy production alternative. In the sustainable area, the implementation of this wind turbine design would begin to generate a culture committed to the integrity of its environment. It would also allow Mexican society to actively participate in international compliance with the Paris Agreement on climate change and the reduction of carbon emissions by the year 2050.

Keywords: *Darrieus Turbine, Distributed Generation, sustainability, turbulence.*

Introducción General

La generación de energía eléctrica mediante la excitación del devanado de armadura de una máquina síncrona es un hecho fundamental en cualquier sistema de potencia que busque satisfacer una alta demanda de carga; sin embargo, el 69.86% de los medios para hacer girar los rotores de los generadores de la red en México son por quema de combustibles fósiles, ciclos combinados y nucleoelectricas, que producen grandes cantidades de emisiones de carbono y sustancias que degradan la integridad de la capa de ozono. Por lo que es conveniente explorar el otro 30.14% restante de los medios de excitación para nuestros generadores: por medios sustentables [1, 2, 8].

En la república mexicana, hay cinco medios de generación de energía eléctrica por medios sustentables. Cuatro de forma general, que corresponden a los medios eólicos, fotovoltaicos, hidroeléctricos y geotérmicos; todos ellos conectados directamente como generadores del sistema eléctrico nacional y aportando corriente a sus respectivas cargas [1, 2, 8]. El quinto es de la índole de generación distribuida a nivel industrial, que corresponde a la energía a través de la biomasa, siendo más específico; al uso de biodigestores para hacer girar una turbina que transforma la energía cinética en energía eléctrica y así contribuir a la alimentación de una planta o fábrica. Sin embargo, todas ellas presentan inconvenientes a escala energética o ambiental. Las turbinas eólicas y placas fotovoltaicas, tienen una eficiencia media del 25% en el mejor de los casos; además de sufrir intermitencias prolongadas de generación, por lo que sus parques de generación deben abarcar una gran área de terreno para compensar sus desventajas; por todos estos motivos, aunque se encuentran como generadores del Sistema Eléctrico de Potencia (SEP), están rezagados como fuentes secundarias y de emergencia. Las plantas hidroeléctricas y geotérmicas requieren grandes inversiones de infraestructura, operación y mantenimiento, dependen por completo de los caudales disponibles en el momento y tienden a estar en zonas muy apartadas de los centros de consumo; lo que implica realizar la instalación de grandes líneas de transmisión y subestaciones eléctricas. Y aunque la generación de energía por biomasa ha demostrado ser prometedora y ha reducido los costos energéticos de muchas empresas de alimentos, aún tiene el inconveniente de que se deben desechar los restos de la reacción química y que los biodigestores requieren un mantenimiento muy concreto y caro.

Está claro que ya no se puede depender más del ciclo combinado y las nucleoelectricas a largo plazo, pero tampoco es correcto someternos a generación sustentable sin correr riesgos de sostenibilidad eléctrica. Por lo que en este proyecto se plantea un híbrido entre las dos partes, seguir siendo alimentado a través de los generadores pertinentes del SEP y aminorar sus costes y su impacto en el medio ambiente a través de un sistema de Generación Distribuida (GD) instalada en una casa habitación del Estado de Puebla; cuyo centro de generación sea una turbina de eje vertical Darrieus de tipo H de baja tensión.

¿Por qué se ha decidido optar por este enfoque? La generación de energía eléctrica por medios sustentables es el necesario sucesor de la quema de combustibles fósiles; sin embargo, estas tecnologías aún están en pañales, cuyas eficiencias energéticas son inaceptables y requieren grandes compensaciones estructurales y mecánicas para satisfacer

las grandes demandas de los consumidores. Pero si, en vez de enfocar las enormes cargas de las industrias o las grandes ciudades, se centra el sistema en alimentar una vivienda; entonces el potencial de generación de la turbina se hace asequible para obtener un beneficio a largo plazo.

La hipótesis a desarrollar en esta investigación es demostrar si el diseño de turbina eólica de eje vertical Darrieus tipo H de baja tensión aquí propuesto es capaz de operar bajo las condiciones climatológicas del Estado de Puebla y alimentar las cargas de un sistema de generación distribuida instalada en una casa-habitación, mostrar las características mecánicas y eléctricas que debe tener este sistema siguiendo las normativas NOM-081-SEMARNAT-1994 y NOM-001-SEDE-2005, así como remarcar todas las ventajas y desventajas energéticas y de impacto ambiental que esta pueda presentar.

Se espera que esta investigación aporte un referente analítico y de diseño para la futura instalación de sistemas GD basados en la generación eléctrica ofrecida por la turbina Darrieus tipo H propuesta; en las residencias del Estado de Puebla.

Con respecto al desarrollo del tema, primero se expondrán las características psicrométricas del Estado Puebla, así como las velocidades de sus flujos de viento; capturadas por el anemómetro de la Red de Monitoreo Meteorológico 12 (RAMM-12) de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. A partir de estos datos, se llevaron a cabo algunas estimaciones cualitativas para poder diseñar los rasgos distintivos del aerogenerador Darrieus en el CAD de Solidworks 2018. En base a las propiedades geométricas del diseño CAD y los datos de recabados por la RAMM-12, se desarrollarán las ecuaciones que describen el comportamiento mecánico y eléctrico que posee la turbina y con respecto a estos, proponer la maquinaria, dispositivos y elementos con los que deberá contar el sistema GD. Además de presentar un análisis CFD, en la herramienta FLUENT de ANSYS 2021; donde se mostrará un análisis del desempeño aerodinámico del modelo de la turbina; en función de este análisis, se harán unas mociones de eficiencia y seguridad para el sistema.

Adicionalmente, se llevó a cabo la manufactura y ensamble de los elementos de la turbina de eje vertical Darrieus tipo H y se llevaron a cabo pruebas para corroborar algunos datos obtenidos en el análisis teórico y el modelo CFD.

Dada las características que comparten todas las turbinas de eje vertical, se espera una eficiencia aerodinámica inferior a la de una de eje horizontal; además de que se deben de considerar las medidas de seguridad para los riesgos inherentes de este tipo de turbinas, como, por ejemplo, el uso de cables tensores en la parte superior del prototipo para asegurar su estabilidad estructural en caso de vientos demasiado fuertes o un estudio que constate que el edificio en el que se llevará a cabo la instalación será capaz de soportar la carga extra. Sin embargo, para la carga que supone una casa-habitación, la alimentación que ofrece es la suficientemente alta para aminorar los costos de Comisión Federal de Electricidad (CFE), además de representar una gran ventaja en la producción de energía eléctrica en las residencias de ciudades cerradas, donde los flujos de viento chocan con los edificios, formando remolinos de aire; y ya que estos diseños no necesitan ser direccionados a las

corrientes de aire; se convierten en los dispositivos de generación eólica adecuados para estos entornos.

Personalmente, más allá de reducir las emisiones de carbono a la atmosfera o recortar los costos de carga de CFE, busco un medio viable de cambiar las enormes áreas de generación que poseen los parques eólicos y fotovoltaicos; porque, aunque suene incongruente, de forma global; son medios de generación que impactan tanto ambiental como económicamente. Dados sus intermitencias, tienden a ser muy desaprovechados energéticamente y, por lo tanto, lo compensan abarcando grandes áreas de terreno rural, desplazando vida animal y evitando que crezca vegetación de forma definitiva. Y por el lado económico, a parte de los costos necesarios para llevar a cabo toda la infraestructura, estos sistemas son incapaces de competir aun con las potencias generadas por las plantas de ciclo combinado y las nucleoelectricas, por lo que los gobiernos las clasifican como generadores secundarios, y repercute en menor atención general. Por todo esto, se apostó por la GD; es necesario dar el alto a la generación por medios sustentables, pero de forma inteligente, no solo instalar por ocupar espacio y decir que alimentas tu hogar de forma “verde”. La contaminación demográfica es inevitable, pero si en vez de usar el espacio que no nos corresponde, ocupamos la azotea de nuestras casas, entonces quizá si se pueda reducir todos estos tipos de contaminante y abastecernos energéticamente de forma inteligente.

CAPITULO I. Proyecto de investigación

1.1 Introducción

En el presente capítulo se hace una descripción de la problemática, motivo de la investigación de un sistema de Generación Distribuida y de la propuesta del diseño de la Turbina Darrieus tipo H de la cual se alimenta. Se contextualizará la situación en la cual se lleva a cabo este proyecto, así como el objetivo general y los objetivos específicos que se cubrirán a lo largo de los capítulos; al mismo tiempo que se describe la forma de abordar el tema, y por último se establecen los alcances del trabajo.

1.2 Problemática

La necesidad de la generación de energía eléctrica a través de medios sustentables es una característica que se imparte a los ingenieros desde sus primeros días de formación, así como los efectos negativos de las emisiones de carbono por quema de combustibles o liberación de refrigerantes hacia la atmosfera terrestre; lo que ha hecho eco en los profesionistas de pequeñas, medianas y grandes empresas de este ámbito reflexionen acerca de su impacto en el medio ambiente y como aporte al Acuerdo de Paris; diseñan y gestionan centros y parques de energías renovables a gran escala.

Pero ¿De verdad estamos reduciendo nuestro impacto en el medio ambiente? La sostenibilidad es el rasgo más relevante en un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP), no importa lo que pase en la línea, está siempre debe ser capaz aportar corriente a sus respectivas cargas, y desafortunadamente; una de las características que poseen los parques eólicos y fotovoltaicos es el inherente riesgo a intermitencias prolongadas, sin contar que las eficiencias de estos sistemas que, en el mejor de los casos, apenas si superan el 25%, lo cual es inconcebible para un SEP. Entonces, ¿Qué se hace en estos casos? Los gobiernos del mundo y las compañías suministradoras han optado por dar dos soluciones de forma parcial; compensar las bajas eficiencias de calidad eléctrica con cantidad, más turbinas, más placas fotovoltaicas, cada vez más grandes, y para contrarrestar las intermitencias, clasifican a estos medios de obtención de energía como generadores secundarios o de emergencia. Lo que nos hace volver a la pregunta del principio ¿De verdad estamos reduciendo nuestro impacto en el medio ambiente? Porque si ya de por si nuestros medios de generación “verde” son ineficaces ¿Tiene algún caso ocupar grandes áreas rurales para un sistema que es intermitente y no sostenible eléctricamente? ¿Qué estas aportando al medio ambiente si desplazas a toda la flora y fauna de la zona? Los entornos en los que se favorece la instalación y operación de los parques eólicos y fotovoltaicos son planicies a la intemperie, zonas rurales que ya no podrán tener una segunda tarea tras llevar a cabo la infraestructura.

Este contradictorio duelo entre la sostenibilidad eléctrica y la necesidad de energías renovables es la principal problemática a resolver en este proyecto. Debemos tomar la responsabilidad sobre la desintegración de la capa de ozono y el cambio climático, pero tampoco es correcto resignarse a no recibir corriente a ciertas horas del día.

Los sistemas de generación de energía sustentable son útiles y necesarios a largo plazo, pero ineficaces o de infraestructura costosa y elaborada; por lo que hay que ser inteligente para compensar su naturaleza, no solo aumentar cantidad, sino calidad. Existen muchos métodos para abordar esta clase de sistemas, pero la forma en que se afrontó en esta investigación es mediante una instalación de Generación Distribuida (GD) cuyo centro de alimentación sea una turbina eólica de eje vertical Darrieus híbrida con una de tipo H, que, en vez de abastecer las enormes cargas del SEP, solo proporcionara corriente a una casa-habitación situado en Estado de Puebla.

La localización y el diseño de la turbina son claves para este proyecto. La ubicación dentro del valle de Puebla implica una cantidad de turbulencias de viento más alta que en las planicies en las que se suelen instalar parques eólicos, que tienden a ser diseños de eje horizontal y, por lo tanto, deben ser direccionadas hacia los flujos del aire. Aquí entra el segundo punto clave; el diseño de eje vertical Darrieus tipo H, que, por su naturaleza mecánica de captar los vientos con sus palas de forma perpendicular, hace que afronte de forma más eficiente las turbulencias.

Otro punto clave de esta investigación es el centro de carga a alimentar. En vez de pensar en alimentar los millones de MW de todo el SEP, este proyecto se enfocó únicamente de satisfacer la potencia de una vivienda estándar, haciendo más asequible la instalación de todo este sistema de GD. También contrarresta la problemática del espacio a ocupar de los enormes parques eólicos, en vez de utilizar grandes áreas rurales, se utiliza espacio de la vivienda; preferentemente la azotea, para la pequeña infraestructura del aerogenerador Darrieus tipo H.

1.3 Objetivo general

Ofrecer un sistema GD en una casa-habitación en el Estado de Puebla, cuyo centro de generación sea una turbina de eje vertical Darrieus híbrida con una de Tipo H con la capacidad de satisfacer su demanda eléctrica.

1.4 Objetivos específicos

- Explicar las características y ventajas eléctricas que el sistema GD ofrece con respecto a estar siendo abastecido únicamente por el SEP, además de exponer su impacto en el medio ambiente.
- Explicar las características y ventajas mecánicas que el diseño de turbina Darrieus Tipo H propuesto para el sistema GD, además de exponer su impacto en el medio ambiente.
- Analizar las características aerodinámicas de la turbina a través de una simulación desarrollada en la herramienta Fluent de ANSYS 2021.
- Desglosar las características, elementos y dispositivos necesarios para la operación continua del sistema GD.
- Exponer las medidas de seguridad pertinentes a toda la instalación de GD.

1.5 Justificación

Como parte del compromiso estipulado por el Acuerdo de París en 2015; debemos limitar las emisiones de carbono por debajo de 2 °C en relación a los niveles preindustriales, lo que requiere una completa transformación energética, económica y social; por lo que las medidas de generación verde deberán ser cada vez más ambiciosas energéticamente, pero menos invasivas con el medio ambiente. Lo cual es un tema relevante, ya que; la discusión entre lo sostenible y lo sustentable es una dicotomía que; en el ámbito de la ingeniería, es controversial. Los sistemas de generación sustentable ofrecen una alternativa de coexistir con la naturaleza, mientras nos abastecemos a través de la captación de recursos renovables y su transformación en energía eléctrica; desafortunadamente, estos medios apenas si llegan a un 25% de eficiencia; por lo que se recurre a dos opciones, la primera es compensar la baja eficiencia instalando una gran cantidad de estos sistemas en un vasto territorio, o la segunda es rezagar estos métodos como vías secundarias de generación.

En esta investigación, se ofrece una tercera alternativa, cuya relevancia yace en la implementación del diseño de una turbina de eje vertical Darrieus híbrida con una de tipo H, adaptada para operar bajo las características psicométricas del estado de Puebla, en México. Ahora las preguntas pertinentes serían ¿Cómo este aerogenerador va a contrarrestar las bajas eficiencias de sus hermanos “las turbinas eólicas”? ¿Este diseño realmente equilibra esta dicotomía entre la “sostenibilidad” y la “sustentabilidad”? ¿Cómo opera bajo las condiciones del estado de Puebla para que pueda considerarse una alternativa asequible?

Siendo pragmáticos, esta turbina eólica no está conectada como generador al Sistema Eléctrico de Potencia, sino a un Sistema de Generación Distribuida instalada en una casa-habitación en los suburbios de Puebla. La demanda de potencia del domicilio hace más asequible la relación entre la energía generada con la consumida.

Este sistema no solo nos ofrece tener un medio de generación cerca de nuestro hogar y tener completo control en ello, sino que también resuelve una de las más grandes adversidades sobre la discusión entre la Sostenibilidad con la Sustentabilidad; el espacio de operación. En México, generalmente, si se observa que cualquier sistema de generación renovable es incapaz de satisfacer las demandas de los consumidores del SEP, se opta por la instalación de varios de estos para compensar la demanda, lo que implica que grandes áreas de terreno rural sean despejadas para montar los parques de generación, desplazando a toda la fauna de la zona y que la vegetación ya no sea capaz de volver a crecer; lo cual, contradice uno de los principios de la sustentabilidad por el bien de la sostenibilidad eléctrica; la coexistencia con la naturaleza. Sin embargo, ya que este sistema de GD está instalado en nuestra residencia, la invasión de territorio es mínima o nula, ya que se está ocupando espacio propio, ya sea montando la turbina en el tejado o al lado de nuestro hogar.

Curiosamente, también resuelve un problema adjunto a la naturaleza mecánica de las turbinas eólicas. Por lo general, tendemos a encontrarnos que la mayoría de los parques eólicos del mundo son de eje horizontal, dada su gran ventaja aerodinámica con respecto a las de eje vertical, además de un comportamiento en grupo más eficiente. Sin embargo, estos parques se asientan en planicies y zonas cuyo relieve permite el paso libre de los flujos de viento sin turbulencias; una característica geográfica que no posee el estado de Puebla, su localización en medio del Valle de México lo convierte básicamente en un plato donde circunda el aire.

Esta particularidad puede ser aprovechada por las turbinas de eje vertical, que no requieren ser dirigidas en el sentido del viento y que puede beneficiarse de las turbulencias resultantes de la zona.

1.6 Alcance

Se hará el análisis de la turbina de eje vertical Darrieus tipo H a través de sus ecuaciones de operación y sus características geométricas, así como las condiciones psicométricas del Estado de Puebla registradas por la Red Automática de Monitoreo Meteorológico número 12 de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (RAMM-12-BUAP). Además, se realizará el análisis CFD del aerogenerador para poder observar su comportamiento mientras los flujos de viento son captados por las palas en la herramienta FLUENT de ANSYS 2021.

Asimismo, se seleccionarán los elementos y se explicará las características con las que deberá contar el sistema de Generación Distribuida para que opere de forma eficiente al menor costo posible, sin poner en riesgo la instalación. También se indicarán las medidas de seguridad pertinentes para la tipología de riesgos inherentes a las turbinas de eje vertical.

Explorar y analizar todas las ventajas de este sistema de GD para su futura implementación en los edificios del Estado de Puebla y ciudades con condiciones similares.

CAPITULO II. Antecedentes, contexto histórico y principios fundamentales

2.1 Introducción

En este capítulo, se describirán los antecedentes históricos, fundamentos y conceptos principales correspondientes a la energía eólica, los sistemas de Generación distribuida y las características geométricas, mecánicas y de operación de las turbinas de eje vertical, así como su implementación en la República mexicana. De igual manera se aportará un panorama actual de la situación en lo que respecta la generación de energías sustentables en México, además de los compromisos generales de instalación de futuros equipos de generación limpia según el Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN) 2021-2035.

2.2 Antecedentes

Los diferentes sectores energéticos del mundo coinciden en que el desarrollo y fomento de la generación por medios sustentables a nivel mundial es relativamente reciente y comenzó a cobrar importancia en las últimas décadas del siglo XX [32]. La preocupación internacional por contrarrestar el cambio climático provocado en su mayoría por el progreso y uso de combustibles fósiles, impulso a los sectores gubernamentales del mundo, en la búsqueda de fuentes alternativas de energía que fuesen amigables con el ambiente, se comenzaron a diseñar políticas que promovían la investigación de medios sustentables para generar energía eléctrica; de las cuales se destacan la eólica, la fotovoltaica, la geotérmica y el mejoramiento de las hidroeléctricas [30, 32].

A partir de este discurso de desarrollo sustentable a nivel global, se llevó a cabo un impulso intencional de este tipo de energías a través de campañas de comunicación acerca de sus impactos positivos. México no se quedó atrás ante esta nueva idea energética, y comenzaron diferentes acciones a nivel nacional para promover este tipo de energía [30, 32]. En la década de 1990, arrancaron los primeros estudios de potencial eólico y fotovoltaico, mostrando resultados alentadores para la inversión renovable en el Istmo de Tehuantepec por la parte eólica [32].

La generación de energía eólica en México inicio con la puesta en marcha del parque eólico “La venta”, ubicado en Oaxaca en 1994 por licitación de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), a partir de ese momento; dadas sus condiciones geográficas, el estado de Oaxaca se convirtió en un lugar clave para el desarrollo de generación eólica por más de 20 años, llegando a contar con hasta 15 centrales eólicas en operación a lo largo del Istmo de Tehuantepec, tal y como se muestra en la Figura 1 [30,32].

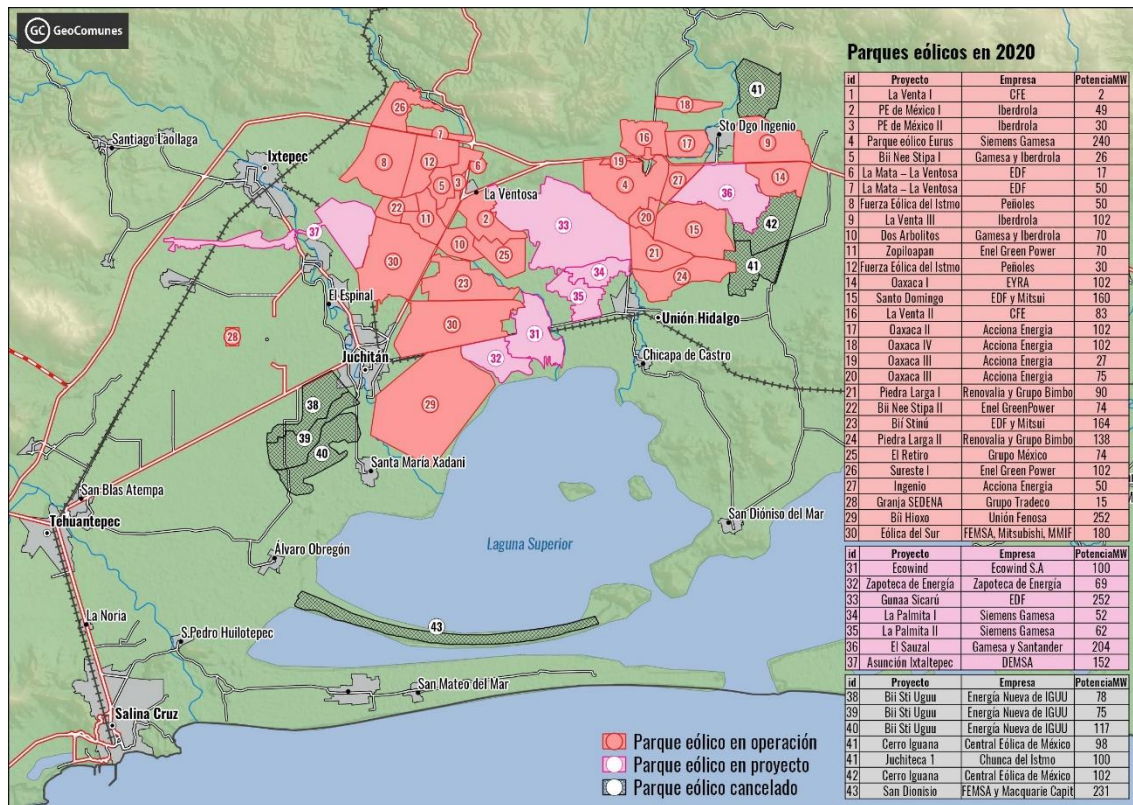


Figura 1 Corredor eólico en el Istmo de Tehuantepec, Oaxaca, México en el año 2020. Fuente: Environmental Justice Atlas (2020).

El Istmo de Tehuantepec no fue la única región de interés en el país, pero dada la gran calidad de recurso eólico, fungió como de punto de referencia para futuros parques eólicos [32]. En los últimos años, con las últimas reformas realizadas en el ámbito energético, posibilitó la introducción de nuevas empresas al mercado y la diversificación de la industria de generación eléctrica, permitiendo así, tal y como se muestra en la figura 2; proyectos en Baja California Sur, San Luis Potosí, Zacatecas, Veracruz, Chiapas, Yucatán, entre otros estados [30, 32, 42].

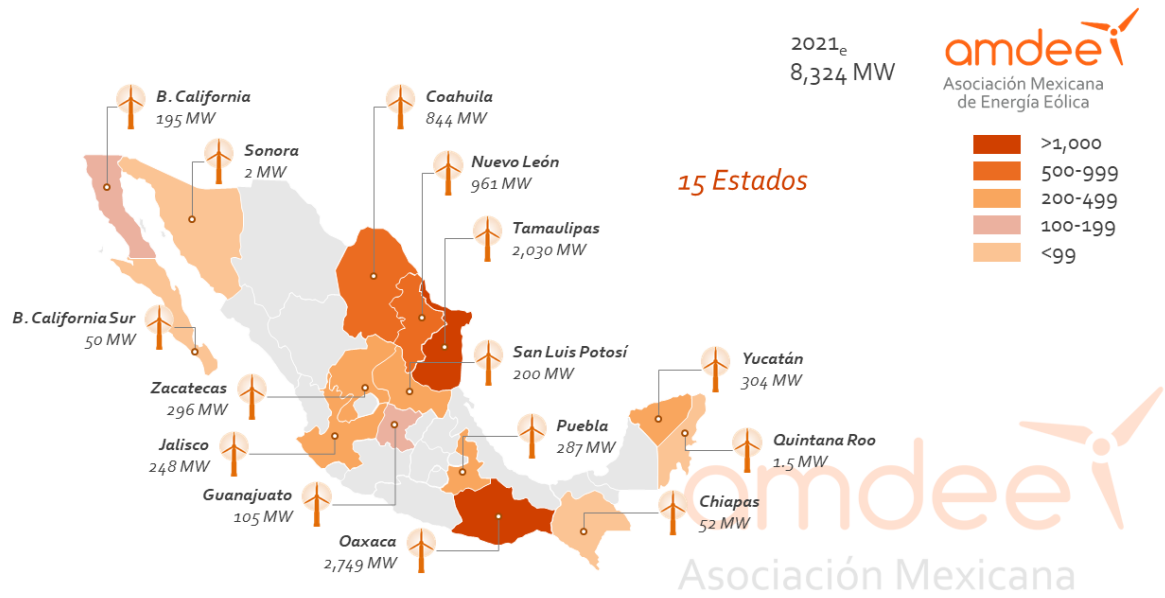


Figura 2 Mapa eólico de México y su producción en MW, año 2021. Fuente: Mapas eólicos. Asociación Mexicana de Energía Eólica (2021). Recuperado de: <https://amdee.org/mapas-eolicos.html>

Para promover la inversión del sector privado en la producción de energía eólica, la Comisión Reguladora de Energía (CRE) generó la figura llamada “las temporadas abiertas” y se aprovechó la modalidad existente de autoabastecimiento [32, 43]. A partir de éstas, diferentes empresas aceptaron llevar a cabo importantes inversiones para desarrollar la infraestructura de transmisión y asegurar con ello su participación en el mercado eólico mexicano [32]. Sin embargo, la gran cantidad de empresas involucradas, hicieron que las comunidades circundantes y varios consumidores se plantearan “¿Para quién y cómo se está usando esta energía?” Dadas las intermitencias de los parques eólicos y las eficiencias medias de estos, se generó desconfianza entre las comunidades y las empresas, ya que concluirán que estas recibían energía a menores costos que el resto de los consumidores; este descontento se acrecentó considerando que ocupaban una gran cantidad de área rural cercana a estas comunidades [32].

Si bien, es incorrecto decir que en todos los proyectos hubo desacuerdos con la comunidad, ya que cada proyecto, empresas y comunidad planteaban un contexto y circunstancias diferentes [30]. En las entrevistas realizadas por el Centro de Colaboración Cívica de México (CCC) a ingenieros participantes en las obras; algunos atribuyen los contratiempos a que en algunos lugares el nivel educativo y la calidad de vida eran superiores que en otras en donde existía un fuerte rezago social previo, otros piensan que las condiciones anteriores se sumaron a capacidades desiguales de negociación, también comentaron que se utilizaron estrategias diversas por parte de las empresas para realizar estos acercamientos [30, 32]. Los diferentes sectores coinciden en que las características de los proyectos que operan en la actualidad tuvieron que adaptarse a los contextos regionales que existían previamente a la implementación. Algunas regiones se encontraban divididas en diferentes grupos políticos que buscaron la manera de inscribir los parques a su esfera de influencia. Otras se

encontraban en franco rezago económico y social donde los proyectos fueron vistos como la oportunidad de desarrollo que estaban esperando desde hacía tiempo [32].

Como se pudo apreciar, ha habido muchos problemas para adaptar grandes proyectos eólicos en México durante los últimos 30 años, repercutiendo en que, aunque muchos de ellos han salido adelante y están actualmente en operación instalados como generadores al SEP regido por el Mercado Eléctrico Mayorista, conllevan un gran compromiso por parte de las comunidades cercanas a estas, las empresas que las instalan y el sector gubernamental que la licita [30, 32, 43, 44]. Y todos estos son únicamente contratiempos que no son inherentes a la naturaleza mecánica o eléctrica con las turbinas eólicas, las cuales se exploraran en los siguientes temas del capítulo, cuyo panorama general puede ser sombrío. Por años, hemos sido sugestionados por los medios de comunicación acerca de los sistemas de generación sustentable, y aunque muchas de las ventajas que se comentan son verdad, la realidad es que estos tienden a tener grandes desventajas de sostenibilidad. Sin embargo, más allá de los conflictos durante la gestión de estos sistemas, también se han encontrado estrategias para contrarrestar estas inconveniencias por parte de la ingeniería mexicana, unas mejores que otras, pero, aun así, un esfuerzo palpable para alcanzar generar energía limpia.

2.3 Turbinas eólicas

También llamados aerogeneradores, son turbomaquinarias que transforman la energía cinética de los flujos del viento en energía eléctrica [11, 12, 14]. Las características de sus partes varían con respecto al tipo de turbina instalada para su determinada región, pero esencialmente se conforman de dos conjuntos de partes; una mecánica que se encargara de captar y transmitir la energía cinética, la cual se compone de las aspas, el rodete, el tren de engranes y en caso de ser necesario; un mecanismo de freno, y una eléctrica, cuya tarea será transformar la rotación del eje de transmisión en energía eléctrica a través de un alternador y mediante cables conductores, transportar la corriente generada [3, 4, 5, 9, 10]. En la figura 3, se puede observar un esquema general con las partes de una turbina eólica [48].

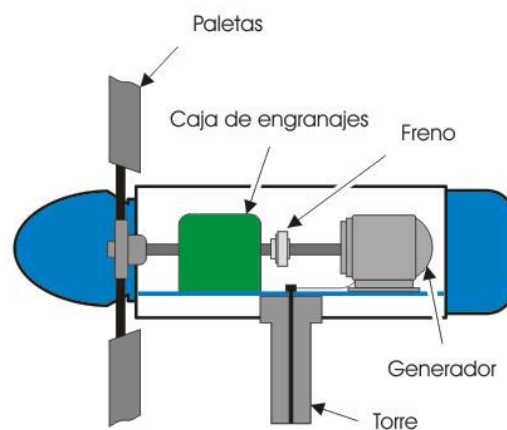


Figura 3 Esquema de las partes básicas de una turbina eólica *Fuente: Gecko Solar. División mexicana. (2016).*

Siendo pragmáticos, si se espera que una turbina eólica sea asequible y que opere correctamente, dado su costo de instalación, su tamaño y el espacio que ocupa con respecto a la energía que generara, se necesitaran más elementos que los que se muestran en la figura 3 [9-12]. Pero estas dependen y cambian del tipo de aerogenerador en las que están instalados, incluso se prescindan o maximiza su uso, según precise las características geométricas, mecánicas o eléctricas con las que cuente la turbina [1-5]. Estas características se mostrarán y justificarán a lo largo del capítulo, así como su naturaleza de generación, resaltando sus ventajas, desventajas, zonas optimas de operación y los parámetros psicrométricos en las que se aprovecha mejor su funcionamiento.

Otro detalle a resaltar es la clasificación de rango de potencia que poseen estos aerogeneradores; dentro de la energía eólica existen dos rangos de potencia diferentes [49]:

1. Desde 100 KW hasta aproximadamente 9 MW de generación de potencia, que es la máxima cantidad de MW que se ha alcanzado hasta la fecha. Corresponde a las turbinas eólicas grandes y convencionales, instalados generalmente en extensos parques eólicos [29, 49].
2. Generación de potencias por debajo de 100 KW, también conocido como el rango de la mini-eólica. Su uso es muy valorado en el ámbito de la Generación Distribuida a nivel industrial y doméstico [29, 49].

2.3.1 Alternador trifásico

Ya que se está abordando el tema de la generación eléctrica, como se mencionó anteriormente; se lleva a cabo a través de un alternador al que se le provee del torque de la turbina a través de un eje de rotación, por lo que el principio de generación de este sistema sustentable es el de una maquina síncrona [5, 9, 49, 50, 51, 52]. Este principio, en relación al giro del rodete de la turbina implica que, la rotación provista por la captación del viento será lo que permita el giro del circuito de campo (o rotor) y permita excitar por medio de su campo magnético el circuito de armadura (o estator), induciendo su propio campo magnético y, por lo tanto, corriente alterna [49–52]. En la figura 4 se puede observar un esquema de los ensambles físicos de un alternador.

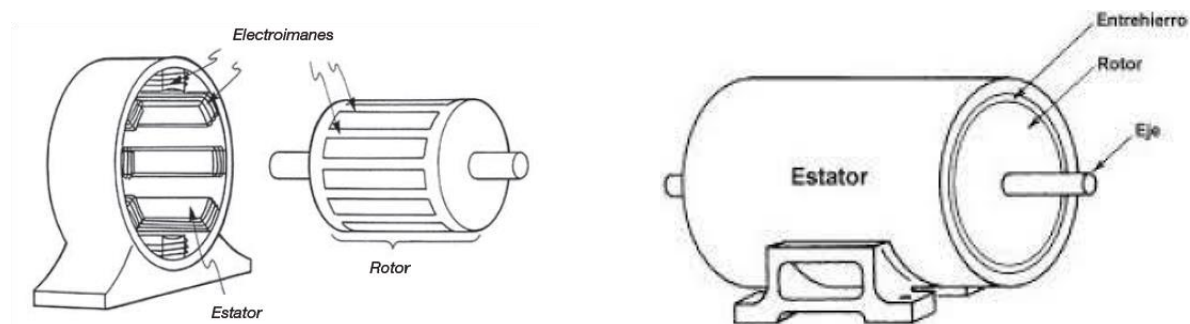


Figura 4 Esquema físico del alternador Fuente: Leiva, F., Pontt, O. ELO 281 Sistemas Electromecánicos. Universidad Técnica de Federico Santa María. Capítulo 4: Devanados. 2-38. (2020).

Apreciando el esquema anterior y siendo más preciso con el principio de funcionamiento de un alternador; el giro del rotor hace que los polos de sus devanados giren con él, alternando los extremos “Norte” y “Sur” con los polos de las bobinas del estator, induciendo un campo magnético en el devanado de la fase en la que está pasando uno de los polos; y como sigue girando el rotor, los polos magnéticos del eje inducirán un campo magnético en las fases de la armadura, que intentara alinearse con el campo magnético del inducido, haciendo que este campo gire en la misma dirección y velocidad que este; conciliando un estado de sincronismo [49–53]. En la figura 5 se muestra un esquema del comportamiento de los campos magnéticos del inductor y el inducido.

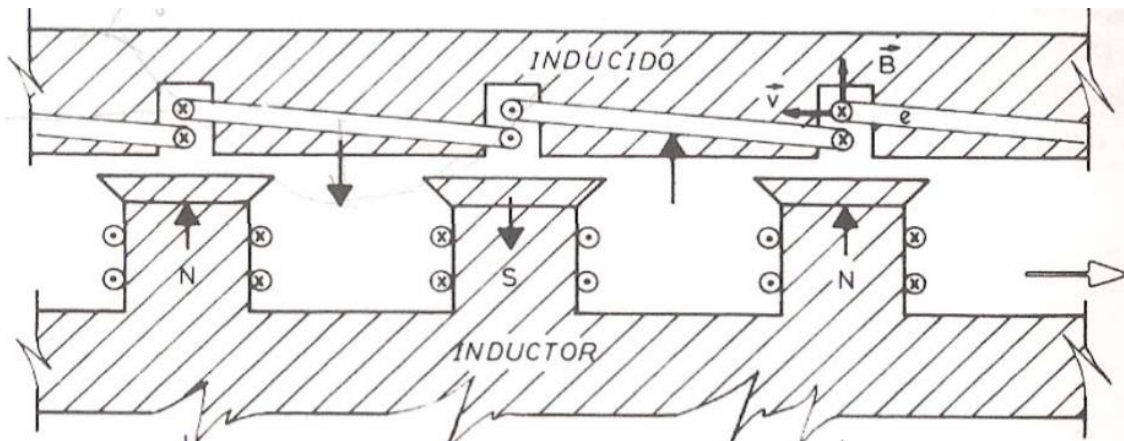


Figura 5 Esquema magnético de un generador síncrono en carga *Fuente: Electrotecnia aplicada a maquinas síncronas. Máquinas eléctricas. Capítulo 4. (2013).*

Dadas las implicaciones de producir un flujo magnético entre dos puntos de un circuito; la expresión que relaciona este flujo a través de un conductor con resistencia magnética es de Fuerza Magnetomotriz, que describe la cantidad de corriente eléctrica producida con respecto al número de espiral con las que cuentan los devanados [49-53]. La ecuación 1 expresa las variables que describe la fuerza magnetomotriz.

$$F = \phi R = NI \quad (1)$$

Donde:

F = Fuerza magnetomotriz (Av)

ϕ = Flujo magnetico (Wb)

R = Relugtancia del material (A^v/Wb)

N = Número de espiral de la bobina (vueltas)

I = Corriente electrica (A)

Como se mencionó anteriormente, los campos magnéticos de las bobinas del inducido se ven atraídas por los del inductor, pero nunca podrá alcanzarlo completamente, ya que, si este lo alcanzara, se alinearían los polos opuestos del rotor y el estator, bloqueando el eje [49–53]. Para evitar este alineamiento, se instalan tres pares de bobinas conectadas entre sí tanto en el rotor como en la armadura; permitiendo que cuando la corriente alterna pase a través de estos devanados, los electrones de cada bobina cambiaran de dirección en un momento distinto; lo que implica que tanto la polaridad como la intensidad del campo magnético en un momento diferente [49, 51]. Para distribuir este campo magnético de forma eficiente, se rotan estos conjuntos de embobinados 120° , tal y como se muestra en la figura 6 [49-53].

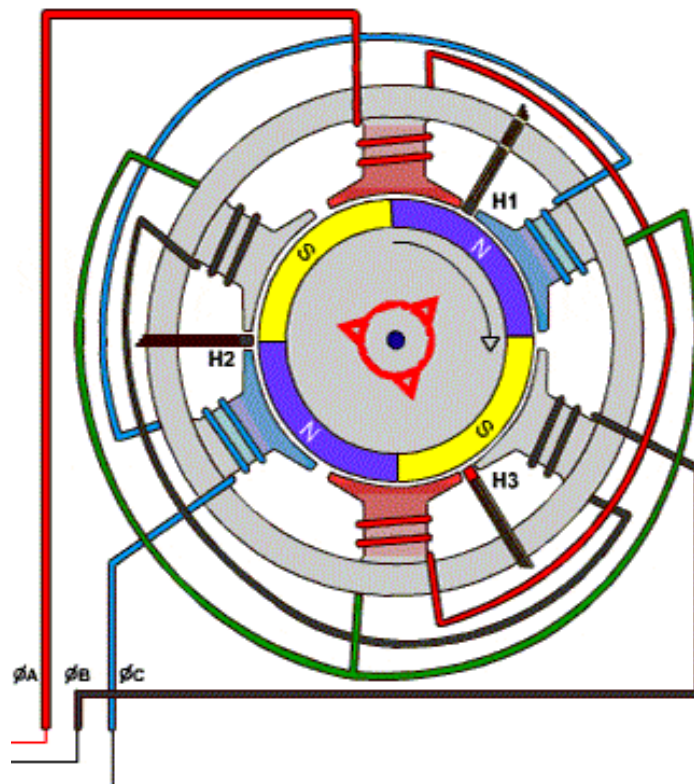


Figura 6 Distribución de bobinas a 120° Fuente: Unisalia. *Como saber cuál es el consumo trifásico o monofásico de la electricidad* (2020).

Antes de continuar con las partes del alternador y con cómo se completan los circuitos de fase para recolectar la corriente generada, aún falta por responder una pregunta más ¿Cómo se energizan las bobinas del rotor? Se supone que las interacciones de los campos magnéticos del inductor con el inducido son los que permiten obtener una señal CA en las terminales del estator ¿Cómo es posible que estén magnetizados los devanados del inductor sino pasa ninguna corriente a través de él? La rotación obtenida en el rodete de nuestro alternador; independientemente de cual sea su forma hacerlo girar, no hace que se formen los polos por si solos, es necesario una corriente directa a través de las bobinas del inductor para que se forme un campo magnético polarizado [49-54]. La solución a esto es una conexión eléctrica

a través de un ensamblaje rotativo llamado “Anillo rozante” (o colector, en caso de que se hable de un motor eléctrico), dispositivos que mediante resortes estacionarios o “escobillas”, cierran un circuito que les provee externamente de corriente directa para formar los campos magnéticos en el inductor [28, 29, 49-53, 55]. En la figura 7 se puede observar un esquema eléctrico y un modelo tridimensional de como lucen los anillos rozantes y las escobillas.

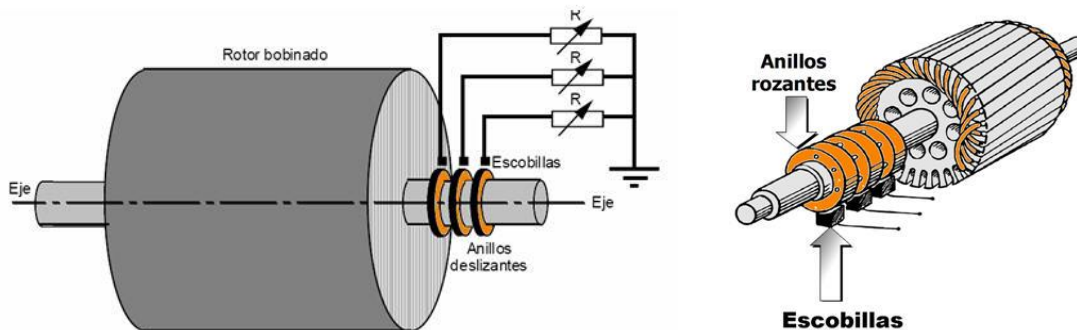


Figura 7 Esquemas de los anillos rozantes y las escobillas *Fuente: Naranjo, B. Birt. L. H. Máquinas rotativas de corriente alterna. (2021). Recuperado de: https://ikastaroak.birt.eus/edu/argitalpen/backupa/20200331/1920k/es/IEA/E/E09/es_IEA_E09_Contenidos/wBSITE_142_motor_de_rotor_bobinado_y_anillos_rozantes.html*

En la figura 8 se pueden apreciar los elementos principales que necesita un alternador para operar [49-53, 55].

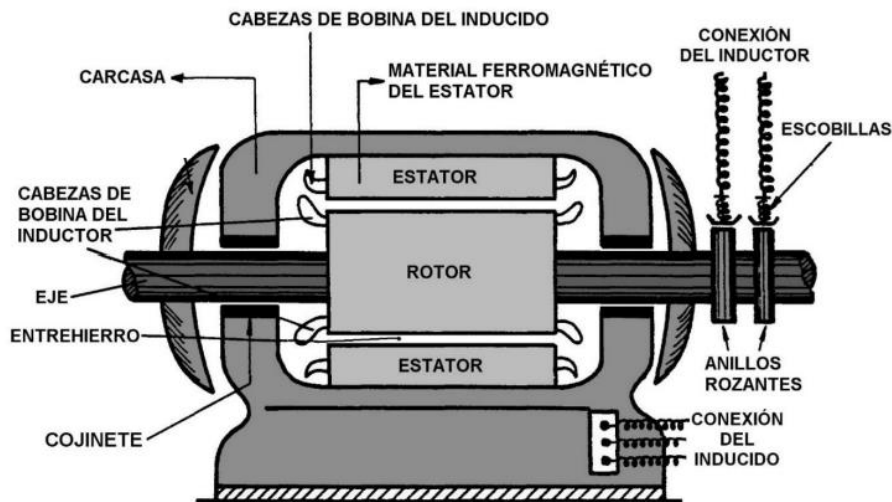


Figura 8 Constitución general de un alternador con rotor cilíndrico *Fuente: Rodríguez, M. Máquinas Síncronas I – G862. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética, Universidad de Cantabria. España. (2015). Recuperado de: <https://personales.unican.es/rodrigma/primer/publicaciones.htm>*

A continuación, se describirán las partes del alternador que aún no se han mencionado.

- *Carcaza*: Placa que cubre y protege al estator y al rotor, cuyo material de manufacturado depende del tipo de alternador al que este protegiendo [50].
- *Cojinete*: Elemento tribológico por el cual se apoya y gira el eje del alternador [50].
- *Entrehierro*: Espacio de aire entre el núcleo del estator y el rotor, ya que ofrece una reluctancia mínima pero necesaria para el funcionamiento del alternador, la cual es directamente proporcional con la distancia entre estos dos elementos; esto ha repercutido en diseños de alternadores cuyo rotor tiene polos cilíndricos en vez de salientes, ya que estos tienen un entrehierro invariable y lo más cercano al estator sin tocarlo, en la figura 9 se pueden apreciar estos dos diseños de rotores [50]. Independientemente del diseño del eje, es necesario que, aunque la maquina síncrona se beneficia de la corta distancia entre el rotor y el estator, estos y sus devanados nunca deben tocarse, ya que provocarían una falla eléctrica que inhabilitaría el alternador [49-53].

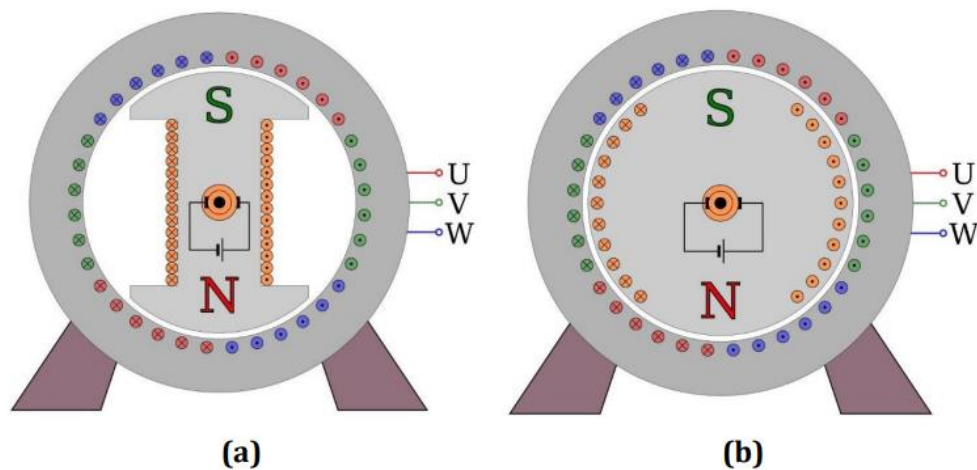


Figura 9 Alternador de polos salientes (a) y alternador de polos cilíndricos o lisos (b) respectivamente
Fuente: Rodríguez, M. *Máquinas Síncronas I – G862*. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética, Universidad de Cantabria. España. (2015). Recuperado de: <https://personales.unican.es/rodrigma/primer/publicaciones.htm>

Nótese que en la figura 8, hay un apartado en donde las terminales de las bobinas del estator completan su circuito, descrita en el esquema como la “conexión de terminales” que, como su nombre lo indica, dependiendo del tipo de conexión, se obtendrán distintos valores de corriente y tensión [49-56]. La decisión de que conexión utilizar estará ligado a los valores nominales de generación para los que se usará el alternador [49-56].

Generalmente, en la placa de datos del alternador, ya está descrita el tipo de conexión en la que opera la máquina, ya sea Delta, Estrella o la configuración que convenga a la situación. A continuación, se explicarán las naturalezas de estos circuitos y sus ecuaciones.

Dado que el alternador de estudio es trifásico, dentro de la caja de conexiones hay seis terminales; tres de ellos conectados a su respectiva fase del inducido, enumerados

generalmente como U_1 , V_1 y W_1 para diferenciarlos, y las otras tres terminales restantes corresponden a la salida trifásica por la que se alimentaran las cargas, igualmente enumerados como U_2 , V_2 y W_2 [49-56]. La primera configuración a considerar para poder completar los circuitos de fase es la Delta, que como se puede observar en la figura 10, se lleva a cabo mediante la conexión alternada de las terminales sub-uno con las de la fase siguiente.

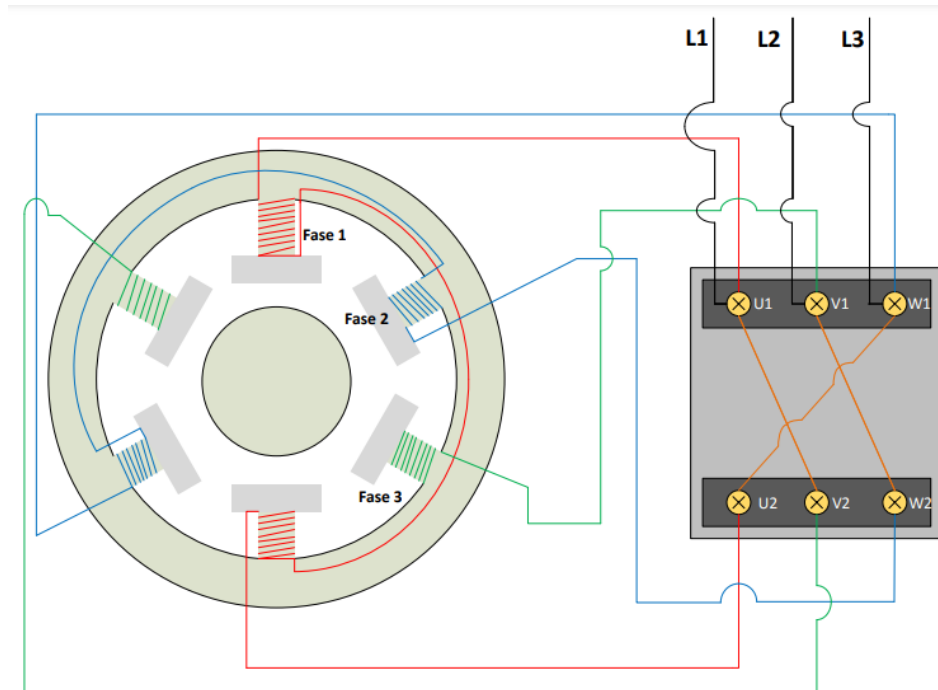


Figura 10 Diagrama de referencia para la configuración en Delta *Fuente: Grupo de tribología y transporte, Facultad de ingeniería, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla; Visio 2016. (2021).*

Incluso, muchos fabricantes de alternador prefieren desplazar un espacio hacia adelante las terminales sub-dos, para que cuando se realice la conexión Delta, no haya necesidad de cruzar los cables [50]. En la figura 11 se puede observar un diagrama eléctrico de la conexión en Delta, sintetizado a partir del esquema de la figura 10.

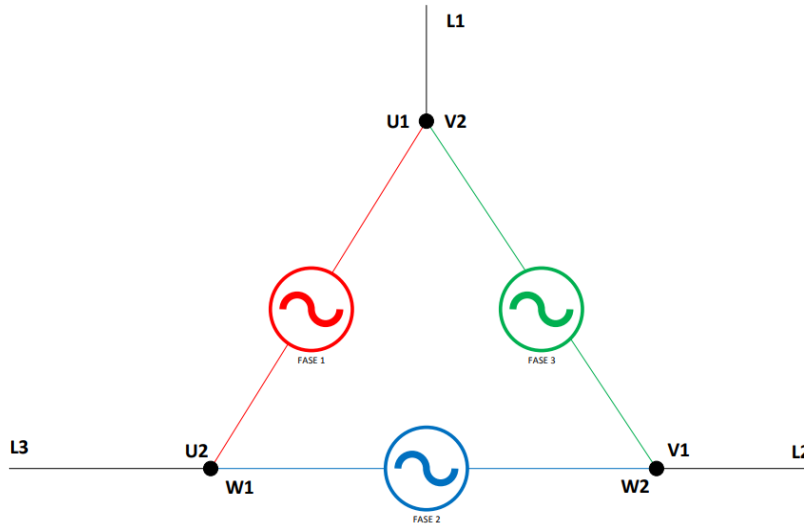


Figura 11 Diagrama eléctrico de la conexión Delta de un alternador *Fuente: Grupo de tribología y transporte, Facultad de ingeniería, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla; Visio 2016. (2021).*

Analizando el esquema de la figura 11 y suponiendo que se trata de un sistema equilibrado, si se está interesado en saber la corriente que se obtendrá en cada una de las líneas, dado que las fases están conectadas a dos bobinas, la expresión que se refiere a la corriente de línea esta descrita por la ecuación 2 [49-56].

$$I_L = \sqrt{3} I_f \quad (2)$$

Donde:

$I_L =$ Corriente de línea (A)

$I_f =$ Corriente de fase (A)

Dado que el sistema está en sincronismo, la corriente del campo será la misma que la corriente de fase. También, es importante contar con el factor de potencia de la máquina para poder determinar en términos de fasor los parámetros de generación [49-56]. El factor de potencia es la relación de diferencia entre el ángulo del voltaje y el ángulo de la corriente, de igual manera, se puede obtener a través del coseno del ángulo de la impedancia, descrito por la ecuación 3 [49-56].

$$\cos \theta = \cos (\angle Z) = \cos \left(\frac{\angle V}{\angle I} \right) \quad (3)$$

Donde:

$\cos \theta =$ Factor de potencia

$\angle Z =$ Angulo de la impedancia de fase

$\angle V = \text{Angulo del voltaje de fase}$

$\angle I = \text{Angulo de la corriente de fase}$

Ya que se cuenta con la corriente presente en las fases, se puede obtener el voltaje en los devanados siguiendo la ley de Ohm análogamente a la corriente alterna, multiplicando esta misma por la impedancia de la bobina; tal y como se muestra en la ecuación 4 [49-56]. Recuerda que, dada la naturaleza de este arreglo, el voltaje de fase es igual al voltaje de línea [49-56].

$$V_f = I_f Z_f \quad (4)$$

Donde:

$V_f = \text{Voltaje de fase (V)}$

$Z_f = \text{Impedancia de fase } (\Omega)$

Finalmente, la potencia que suministra nuestro alternador con una configuración Delta, al igual que en corriente directa, esta descrita por el producto del voltaje y la corriente, pero de forma adicional, dado que cada fase está conectada a dos bobinas, se adjunta la relación de potencias aparente y activa, además del producto de $\sqrt{3}$, ya que el sistema esta balanceado. La expresión que describe la potencia generada está dada por la ecuación 5 [49-56].

$$P = \sqrt{3} V_f I_f \cos \theta \quad (5)$$

Para facilitar la localización de cada uno de los parámetros del arreglo Delta, en la figura 12 se muestra un esquema de la configuración con los criterios de generación antes mencionados.

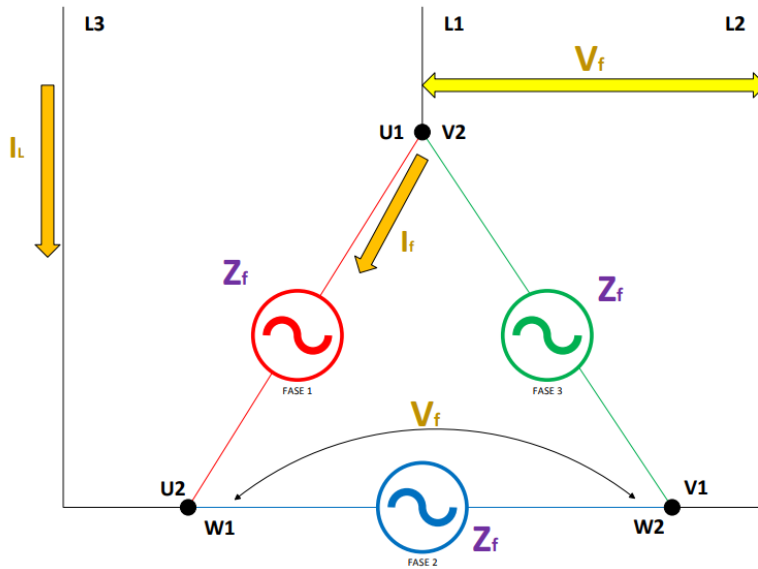


Figura 12 Parámetros de generación en un diagrama eléctrico del arreglo Delta *Fuente: Grupo de tribología y transporte, Facultad de ingeniería, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla; Visio 2016. (2021).*

La siguiente conexión a considerar es el arreglo de Estrella, cuya configuración en la caja de terminales es tal y como se muestra en la figura 13.

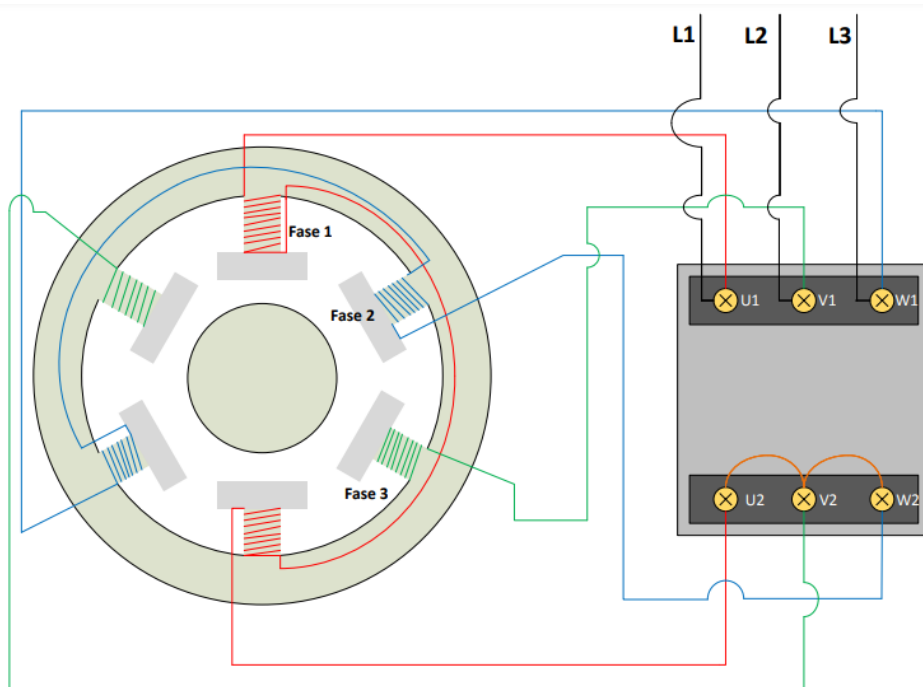


Figura 13 Diagrama de referencia para la configuración en Estrella *Fuente: Grupo de tribología y transporte, Facultad de ingeniería, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla; Visio 2016. (2021).*

En referencia al diagrama de la figura 13, en la figura 14 se muestra el diagrama eléctrico del arreglo en estrella.

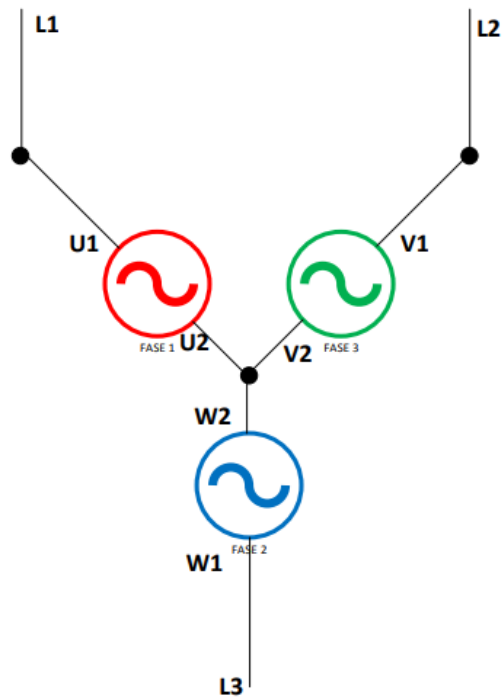


Figura 14 Diagrama eléctrico de la conexión Estrella de un alternador *Fuente: Grupo de tribología y transporte, Facultad de ingeniería, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla; Visio 2016. (2021).*

Analizando el esquema de la figura 14 y suponiendo que se trata de un sistema equilibrado, se puede observar que todas nuestras bobinas están conectadas en un punto compartido, también llamado el “Punto Neutro”; que permite que el cierre el circuito, tal y como se muestra en la figura 15 [50].

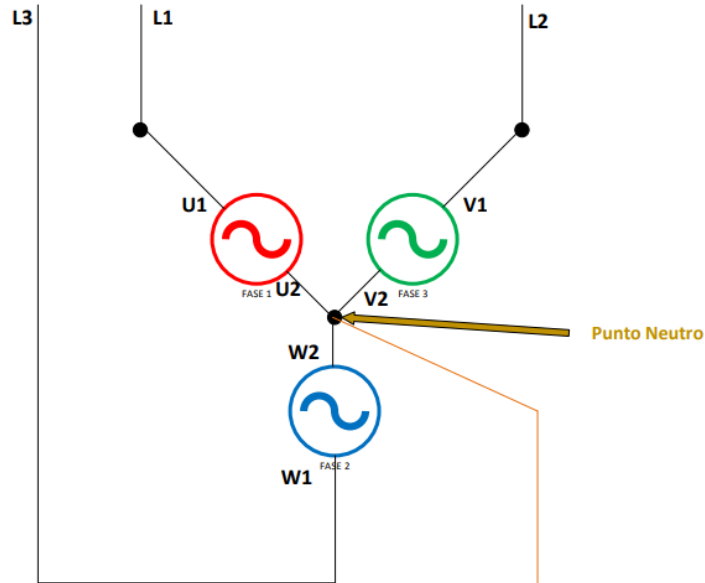


Figura 15 Diagrama eléctrico de la conexión Estrella con punto neutro de un alternador *Fuente: Grupo de tribología y transporte, Facultad de ingeniería, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla; Visio 2016. (2021).*

A diferencia de la configuración en Delta, cada fase de la Estrella no está conectada directamente a dos bobinas, un extremo del devanado está conectado a una fase, pero el otro está enlazado al punto compartido, por lo tanto, el voltaje de línea también es compartido, cuyo valor está expresado por la ecuación 6 [49-56].

$$\frac{V_L}{\sqrt{3}} = V_f \quad (6)$$

En lo que respecta a la corriente, dado que directamente la conexión de la fase se extiende hasta la línea, la corriente de fase es igual a la presente en la línea, tal y como se muestra en la ecuación 7 [50]. Considerando la impedancia de las bobinas de fase, la corriente que genera este arreglo también está regido por la ley de Ohm descrita anteriormente por la ecuación 4 y utilizando el voltaje de fase [49-56].

$$I_L = I_f \quad (7)$$

La ecuación 5 también describe la potencia en Watts en el arreglo en Delta que en Estrella [49-56]. Para facilitar la comprensión de todos estos parámetros, en la figura 16 se muestra un esquema de la configuración con estos criterios.

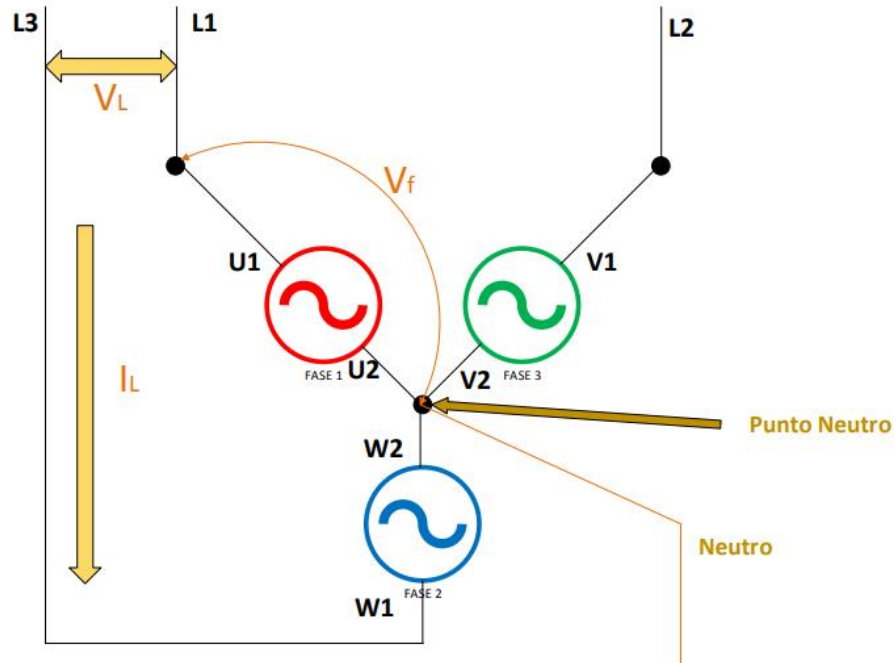


Figura 16 Parámetros de generación en un diagrama eléctrico del arreglo Estrella Fuente: *Grupo de tribología y transporte, Facultad de ingeniería, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla; Visio 2016. (2021).*

Para finalizar, cada uno de estos parámetros están regidos a la velocidad con la que gira el rotor del alternador, ya que la corriente y el voltaje en las bobinas es directamente proporcional a la rotación del rodete. Para conocer la velocidad del generador síncrono, se utilizó la ecuación 8.

$$n = \frac{120f}{p} \tag{8}$$

Donde:

n = Velocidad de rotación (RPM's)

f = Frecuencia (Hz)

p = Par de polos

Proponiendo una frecuencia de 60 Hz y considerando que el alternador de estudio es trifásico, este posee tres pares de polos. Por lo tanto, siguiendo la ecuación 8, la velocidad de giro del alternador sería:

$$n = \frac{120(60 \text{ Hz})}{3} = 2400 \text{ RPM's}$$

Cada país del mundo tiene sus propios límites inferiores y superiores de frecuencia, pero de forma general se puede decir que en la mayoría de los países de América se tiene un nominal de frecuencia de 60 Hz y en Europa de 50 Hz [58]. En la tabla 1, se sintetizaron las velocidades de sincronismo dependiendo su frecuencia y siguiendo la ecuación 8.

Tabla 1 Velocidades nominales de un generador síncrono *Fuente: Schneider electric. Capitulo C, Conexión a la red de distribución pública de BT. (2008).*

Pares de Polos	Frecuencia de 50 Hz	Frecuencia de 60 Hz
2	3000	3600
4	1500	1800
6	1000	1200
8	750	900
10	600	720
12	500	600

2.3.2 Turbinas de Eje Horizontal

Dado que los aerogeneradores absorben de forma mecánica la energía eólica del viento para transformarla en energía eléctrica, la mayoría de los diseños de turbinas en los parques eólicos del mundo son de eje horizontal, puesto que están orientados en dirección a los flujos de viento [11]. También ofrecen la posibilidad de instalarse a una gran altura a través de un poste, en cuya cima se coloca el generador; la elevada altura con respecto al nivel del suelo les permite la captación de vientos de mayor velocidad, lo que implica mayor velocidad de rotación en el eje y mayores capacidades de generación de potencia [12]. En la figura 17 se puede visualizar como luce una turbina de eje horizontal.

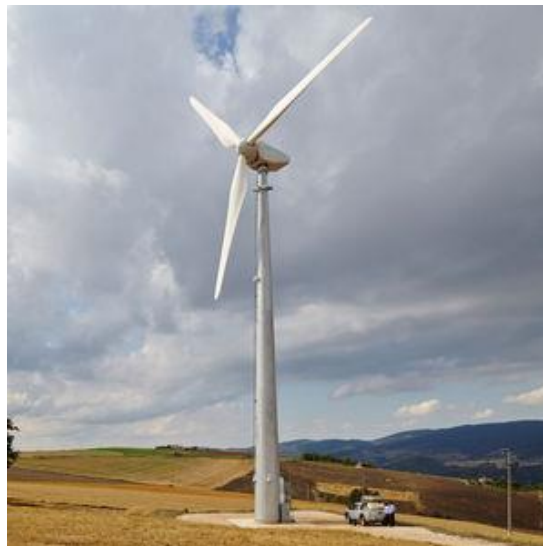
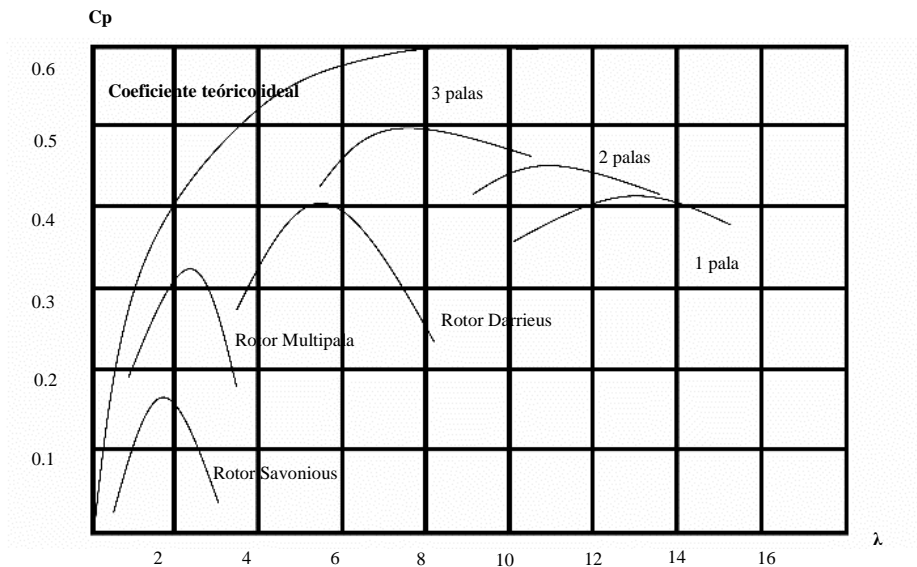


Figura 17 Turbina de eje horizontal *Fuente: Archi-expo. Virtual Expo Group*

Como se puede observar en la figura 17, las HAWT (Horizontal Axis Wind Turbine por sus siglas en inglés) poseen convencionalmente tres palas para captar el viento, ya que aumentan el área de contacto con los flujos del aire, proporciona una mayor suavidad de giro y garantiza una eficiencia media alta con respecto al resto de aerogeneradores. Tal y como se puede observar en la gráfica 1.



Gráfica 1 TSR's con respecto a los coeficientes de arrastres de diferentes turbinas eólicas *Fuente: García., M. Design and construction of a Darrieus vertical axis turbine and analyzed by reverse engineering. Journal Industrial Engineering. Vol. 5. No. 15. (2022).*

Como se logra visualizar de la gráfica 1, cuanto mayor sea la tasa de velocidad de punta (o TSR por sus siglas en inglés), mejor debe ser el perfil aerodinámico de la pala del rotor, de lo contrario, la resistencia que le ejercerá el arrastre del viento (también definido como el coeficiente de arrastre) reducirá la potencia de giro conforme opere el aerogenerador. Por lo tanto, de forma ideal, se busca que una turbina eólica vaya rompiendo su coeficiente de arrastre y mantenga su TSR lo más alto y constante posible [1-4, 9, 11, 49, 62]. La turbina que cumple estas condiciones de forma más fidedigna es la turbina de eje horizontal de tres palas, siendo el aerogenerador más eficiente en existencia [1, 2, 62].

Anteriormente se mencionó el generador instalado en la cima de los postes de las turbinas de eje horizontal, el cual se localiza dentro de una enorme coraza llamada góndola [11, 12]. La góndola, es una cabina que funge como cuarto de máquinas del aerogenerador; en la cual también se encuentra el eje principal, el tren de engranes, los sistemas de control, los frenos y los mecanismos de transmisión [11, 12]. Así mismo, la góndola posee un sistema de orientación, para que la turbina pueda alinearse en sentido del viento [29, 60, 61]. En la figura 18, se puede observar un esquema con todas las partes de una turbina de eje horizontal.

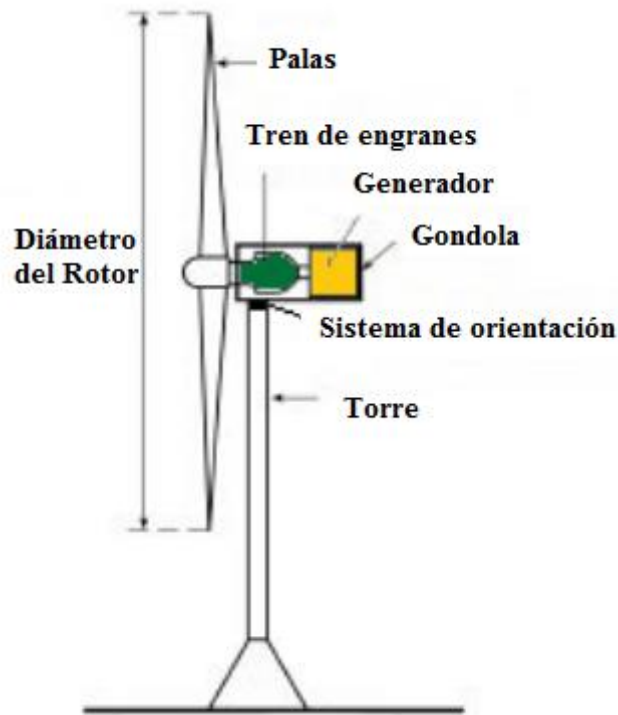


Figura 18 Partes de una turbina de eje horizontal *Fuente: Soriano., L. Modelación de Aerogenerador con compensación difusa. Departamento de Control Automático. (2014).*

A continuación, se describirán las partes del aerogenerador señaladas en la figura 18 y las partes extendidas en la figura 19.

- *Sistema de orientación.* La turbina de eje horizontal está totalmente dirigida y automatizado por un sistema de control, formado por ordenadores y líneas de código que manejan la información que arrojan la veleta y el anemómetro colocados encima de la góndola, de esta manera, al conocer las condiciones meteorológicas se puede orientar de forma más eficiente la turbina y optimizar la generación de energía con el viento presente a partir del motor de orientación [60-62]. La veleta y el anemómetro se pueden observar en la parte superior de la góndola en la figura 19.

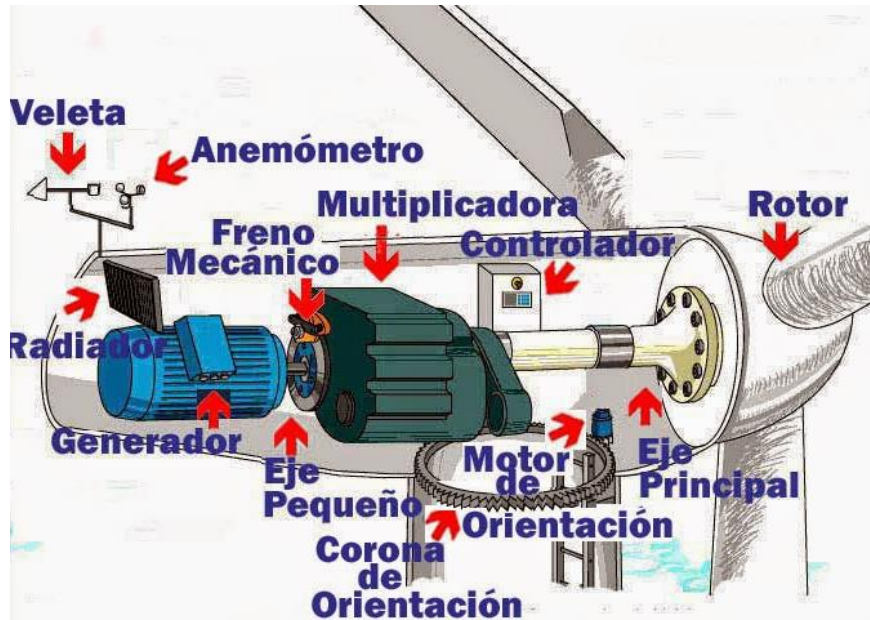


Figura 19 Partes específicas de un aerogenerador de eje horizontal *Fuente: Tecnología y Proyecto integrador. Aerogeneradores. (2014). Recuperado en: <http://tecnologiajuliafernandez.blogspot.com/2014/04/cuestionario-aerogeneradores.html>*

- *Tren de engranes o la Multiplicadora:* Caja tribológica con engranes alineados cuya función es adecuar la velocidad de giro del eje principal a la que necesita el generador [60-62].
- *Freno mecánico:* Sistema de seguridad que cuenta con discos que detiene el eje principal en situaciones de emergencia o para sesiones de mantenimiento [60-62].

Como se puede ver, estos aerogeneradores requieren una gran cantidad de elementos para poder operar, ya que están en la cúspide de la eficiencia energética eólica, sin embargo, muchas de sus virtudes tienden a mermar muchas de sus características. En las tablas 2.1, 2.2 y 2.3 se desglosarán las ventajas y desventajas de estas turbinas.

Tabla 2.1 Ventajas y desventajas de las turbinas eólicas de eje horizontal *Fuente: Grupo de tribología y transporte, Facultad de ingeniería, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. (2021).*

Características	Ventajas y Desventajas	Descripción
Instalación en una elevada altura	✓	El diseño tripala permite que las turbinas sean instaladas a una gran altura, lo que permite la intercepción de vientos de mayor velocidad.
	✗	Dada la altura, es necesaria la infraestructura de una torre, lo que aumenta la inversión mínima de estos.

Tabla 2.2 Ventajas y desventajas de las turbinas eólicas de eje horizontal *Fuente: Grupo de tribología y transporte, Facultad de ingeniería, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. (2021).*

Características	Ventajas y Desventajas	Descripción
Instalación en una elevada altura	✓	Intercepta vientos de régimen laminar en tiempos más constantes, lo que permite un mejor rendimiento y lapsos de intermitencia energética poco habituales
Instalación General	✗	Instalación costosa, dados todos los elementos y requerimientos que necesita
Diseño y Perfil aerodinámico	✓	Poseen una alta eficiencia aerodinámica, con bajos coeficientes de arrastre en comparación del resto de diseños
	✓	Bajos coeficientes de pérdida aerodinámica tras la formación del remolino de viento, lo que permite la posibilidad de instalar varias turbinas de eje horizontal por filas con un riesgo mínimo de que las turbinas de la primera fila acaparen la mayor cantidad de energía
	✗	Requieren un alto par de momento para poder arrancar el generador
Operación	✗	Aunque las turbinas de eje horizontal son conocidas por sus altas velocidades de rotación, la realidad es que deben operar ante un rango de velocidades bajas-medias, la gran longitud de sus palas implica un enorme peligro a altas velocidades de rotación
	✗	Requieren un mantenimiento preventivo regular relativamente costoso y elaborado, que cuente con sistemas de frenado, seguridad y control. Afrontar un mantenimiento correctivo a estos aerogeneradores implica generalmente la inversión de una turbina entera
	✗	Se debe contar con un sistema de amortiguamiento sonoro, los diseños de eje horizontal tienden a ser ruidosos
	✗	Para poder ser eficientes, estos deben contar con un sistema de orientación que los alinee con los flujos del viento
	✗	Dada la naturaleza de la energía eólica, estos sistemas de generación tiene intermitencias de energía, bastante notorias dado que muchos aerogeneradores están conectados al SEP
	✓	En términos de generación eléctrica, son las turbinas eólicas con mayor tasa de generación en existencia. Este dato escala si contamos que la implementación de estas esta adjuntada a la instalación de enormes parques eólicos

Tabla 2.3 Ventajas y desventajas de las turbinas eólicas de eje horizontal *Fuente: Grupo de tribología y transporte, Facultad de ingeniería, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. (2021).*

Características	Ventajas y Desventajas	Descripción
Sustentabilidad	✘	Dado como se instalan los parques eólicos, estos poseen una gran disonancia con la integridad del medio ambiente. Las extensas áreas de ocupación, vibraciones y vallas; desplazan la flora y fauna local de forma permanente
	✔	Con una eficiencia media del 25%, se le considera como uno de los mejores medios de obtención de energía verde del mundo

2.3.3 Turbinas de Eje Vertical

En contraste con las turbinas de eje horizontal, las turbinas de eje vertical pertenecen, en su mayoría, al rango de generación de la mini-eólica, ya que como su nombre lo indica, estos captan los flujos del viento de forma perpendicular a través de sus palas, lo que implican mayores coeficientes de arrastre, y en general, una menor eficiencia aerodinámica [1-6, 9-12, 14, 26]. Sin embargo, a través de los años, los ingenieros han modelado diferentes diseños de VAWT (Vertical Axis Wind Turbine por sus siglas en inglés) que explotan sus características más benéficas, adaptándolas a diversas condiciones climatológicas y obteniendo coeficientes de generación de potencia que, aunque no puedan competir con las HAWT, si puedan adaptarse a sus necesidades de carga a nivel doméstico o industrial; generalmente instalándola en un sistema de Generación Distribuida [1-6, 9-12].

Hay muchos diseños de turbinas eólicas de eje vertical, todos con sus perfiles, características y parámetros de operación propios, pero dada su naturaleza mecánica de captar los flujos de viento; comparten muchas de sus particularidades, así como sus ventajas y desventajas. En las tablas 3.1, 3.2 y 3.3 se desglosa un listado de todos los atributos positivos y negativos que comparten las turbinas de eje vertical.

Tabla 3.1 Ventajas y desventajas de las turbinas eólicas de eje vertical *Fuente: Grupo de tribología y transporte, Facultad de ingeniería, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. (2021).*

Características	Ventajas y Desventajas	Descripción
Instalación a una baja altura	✔	La baja altura del poste, incita a instalar el generador y el multiplicador a nivel del suelo, lo que reduce sustancialmente la inversión, el mantenimiento y los riesgos tribológicos
	✘	Se interceptan flujos de viento de menor velocidad, lo que reduce la excitación de la turbina

Tabla 3.2 Ventajas y desventajas de las turbinas eólicas de eje vertical *Fuente: Grupo de tribología y transporte, Facultad de ingeniería, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. (2021).*

Características	Ventajas y Desventajas	Descripción
Instalación General	✓	Dada la naturaleza de estas turbinas, requieren menos elementos que una de eje horizontal, además de operar bajo parámetros de menor velocidad y demanda, las hace de menor costo en general.
	✗	Se evita alinear varios de estos modelos de turbina, como en un parque eólico, ya que existe una gran posibilidad de que las turbinas de la primera fila acaparen gran parte de la fuerza del viento, formando torbellinos de viento cada vez con menor fuerza conforme avanza por las filas.
	✗	Necesita la instalación de cables tensores acoplados a 2/3 de la altura máxima del poste y la base del suelo, ya que estos tienden a pandear debido a la intercepción del viento.
Diseño y perfil aerodinámico (independiente al tipo de turbina)	✗	Coefficientes de arrastre prologados y bajos TSR's, lo que dificulta romper la inercia del rotor y repercute en bajas velocidades de rotación.
	✓	Interceptan vientos de régimen turbulento con gran eficiencia y con pérdidas de energía mínimas.
Operación	✓	Son capaces de operar con bajas velocidades del viento.
	✓	Dado que requiere menos elementos para poder operar, requieren un mantenimiento preventivo menos costoso en comparación con las turbinas de eje horizontal.
	✗	Al igual que con las turbinas de eje horizontal, afrontar un mantenimiento correctivo a estos aerogeneradores implicara una inversión similar a una turbina nueva en la mayoría de los casos.
	✓	Ya que este tipo de turbinas están perpendiculares a la dirección del viento, estas no requieren un sistema de orientación.
	✓	Contaminación sonora casi nula, debido a que estas turbinas operan a bajas velocidades y por lo tanto, se puede prescindir de un sistema de amortiguamiento sonoro.
	✗	Dada la naturaleza de la energía eólica, estos sistemas de generación tiene intermitencias de energía.
	✗	En términos de generación eléctrica, las turbinas de eje vertical están muy por debajo de las tasas de eficiencia de las de eje horizontal. Esto dependerá mucho del tipo VAWT que esté operando.

Tabla 3.3 Ventajas y desventajas de las turbinas eólicas de eje vertical *Fuente: Grupo de tribología y transporte, Facultad de ingeniería, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. (2021).*

Características	Ventajas y Desventajas	Descripción
Sustentabilidad	✓	Ya que estos diseños no son eficientes alineados en grupos, tal y como se haría en un parque eólico, se prefieren implementar de forma individual, alineados en una única fila o agrupados de tal forma que dibujen un cuadrado de 2x2. Por lo que su relación de sustentabilidad con respecto al espacio que ocupa es más congruente que con las turbinas de eje horizontal. Es menos invasivo y se pueden ocupar los tejados o áreas reducidas para su instalación.
	✗	Con una eficiencia media máxima del 15%, estas turbinas son rezagadas a alimentar cargas más pequeñas. Además de que su baja eficiencia no puede compensarse instalando grandes cantidades de estos diseños, por las pérdidas de energía eólica en las primeras filas. Estas las convierte en medios de generación de energía renovable menos potente, sin embargo, puede adaptarse a un sistema de Generación Distribuida, para maximizar sus ventajas.

Entre la diversidad de diseños de turbinas de eje vertical existen muchos perfiles de palas e híbridos entre ellos, pero los modelos más representativos son los rotores Savonius, Darrius y Tipo H, los cuales pueden visualizarse en la figura 20 [1-6, 9-12, 14, 26, 49].

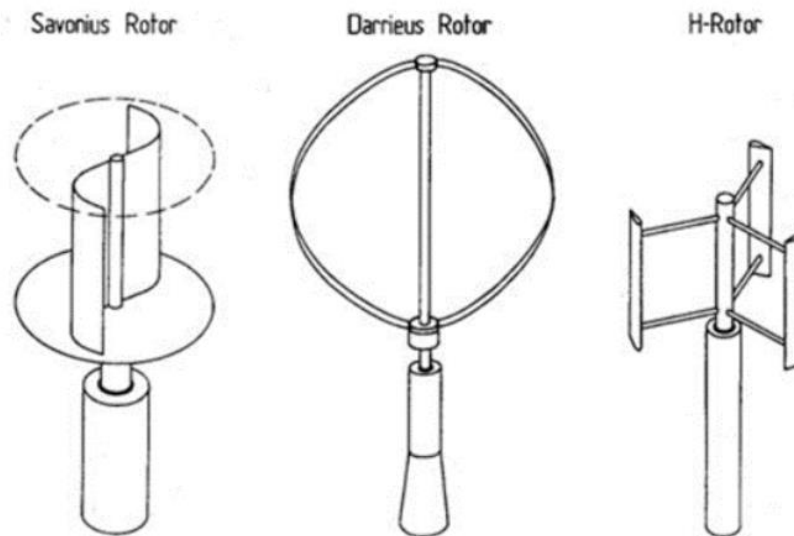


Figura 20 Diseños de turbinas de eje vertical *Fuente: Vidal, D. Diseño de un aerogenerador Savonius para uso doméstico. Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño, Universidad Politécnica de Valencia. España. (2019)*

2.3.3.1 Turbina Savonius

Diseñado por el ingeniero finlandés Sigurd J. Savonius en 1922, y cuyo ensamble consta de dos o más secciones cilíndricas con un perfil curvado. En la figura 21 se puede observar el ejemplo de una turbina de eje vertical Savonius.



Figura 21 Turbina de eje vertical Savonius *Fuente: Vázquez, M. Diseño de una turbina eólica de eje vertical con rotor mixto. (2007).*

El principio de funcionamiento de este tipo de rotores se basa en un peculiar comportamiento aerodinámico provocado por la curvatura de sus palas y su casi convergencia en el centro de la turbina; la colocación de las palas provoca una diferencia de resistencia aerodinámica de cada alabe, haciendo que una de ellas absorba la energía cinética del viento, mientras que la otra desvía el viento hacia los laterales [2, 11]. A partir de aquí, aparece uno de los principales conceptos de los rotores Savonius, la propulsión por fuerzas de arrastre (o “drag”, por su tracción del inglés); ya que la pala es la que capta y absorbe la energía cinética de los flujos de aire, esta es arrastrada en la misma dirección del viento y permite la excitación mecánica del rotor, pero el flujo residual que se desvía hacia los laterales de la turbina, más específicamente, la que se desvía al centro del aerogenerador, ofrece un parámetro adicional que puede hacer variar el comportamiento de la turbina. A este espacio entre los alabes se le conoce como “superposición”, representada por la letra “e” [49]. En la figura 22 se puede observar un esquema acerca del principio de funcionamiento de las turbinas Savonius.

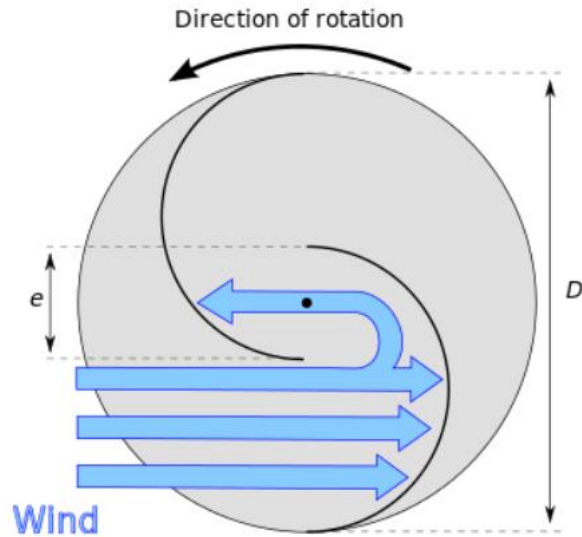


Figura 22 Principio de funcionamiento de las turbinas Savonius *Fuente: Vidal, D. Diseño de un aerogenerador Savonius para uso doméstico. Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño, Universidad Politécnica de Valencia. España. (2019)*

La geometría de las palas y la naturaleza de cómo gira el rotor permite captar los flujos de viento de cualquier dirección, incluso en régimen turbulento, ofreciéndole una gran flexibilidad de operación, así como la posibilidad de prescindir de un sistema de orientación. Sin embargo, esto también adjunta algunos inconvenientes, el principal de ellos es que el movimiento de la turbina propiciara la generación de torbellinos de menor energía en la salida del rotor, tal y como se muestra en la figura 23, fomentando que, aunque estos diseños puedan trabajar con turbulencias; en el caso de que se decida alinear y agrupar estos modelos como en un parque eólico, las turbinas de la primera fila acaparen la mayor cantidad de energía eólica, rezagando las restantes [2, 4, 11, 49].

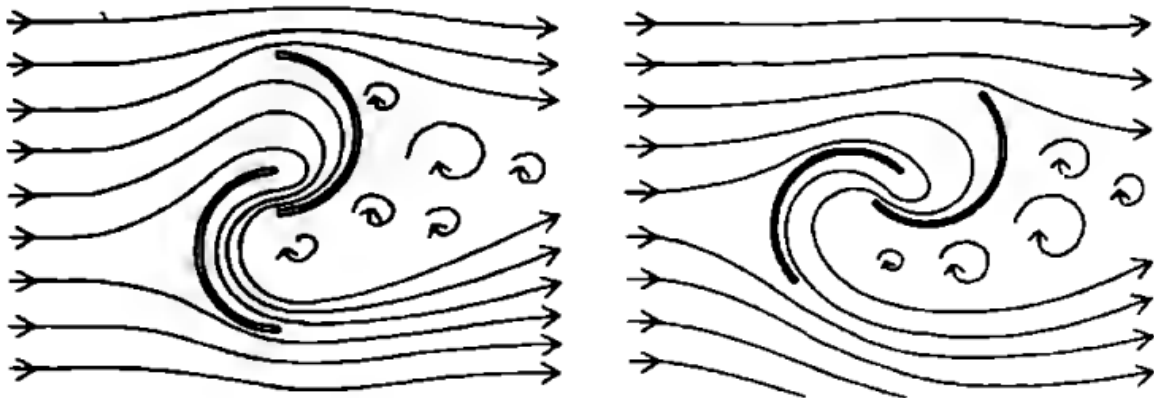


Figura 23 Generación de torbellinos de menor energía *Fuente: Estrella, B. Prototipo Experimental Turbina Eólica de Eje Vertical. Tecnológico de Monterrey. (2008).*

2.3.3.2 Turbina Darrieus

Diseñado por el ingeniero aeronáutico francés George J. M. Darrieus en 1926, y cuyo rotor se compone de dos o más palas curvadas aerodinámicamente, de tal forma que, al captar los flujos de aire, la velocidad incidente del viento varía en cada segmento del alabe y a lo largo de la trayectoria de rotación, esto quiere decir que el ángulo y la intensidad del viento dependen de la posición que tenga la pala en ese momento [1, 11, 49]. En la figura 24 se puede observar el ejemplo de una turbina Darrieus.



Figura 24 Turbina de eje vertical Darrieus *Fuente: Vázquez, M. Diseño de una turbina eólica de eje vertical con rotor mixto. (2007).*

Dada la forma de sus alabes, su manufactura es complicada, pero son estas mismas geometrías las que hacen que la turbina eólica Darrieus sea uno de los medios de generación de energía sustentable más rentables (recuerden que se habla del rango de la mini-eólica) y eficientes que se pueden instalar en un Sistema de Generación Distribuida [1, 63]. También las hace versátiles, no tan solo a que sean instalados y adaptados en cualquier lugar con potencial eólico, sino también a la posibilidad de ensamblar otro tipo de turbinas de eje vertical a ellos o diseñándolos como un híbrido para poder contar con las ventajas de ambos modelos, tal y como se puede observar en la figura 25 [1, 11, 49, 63].

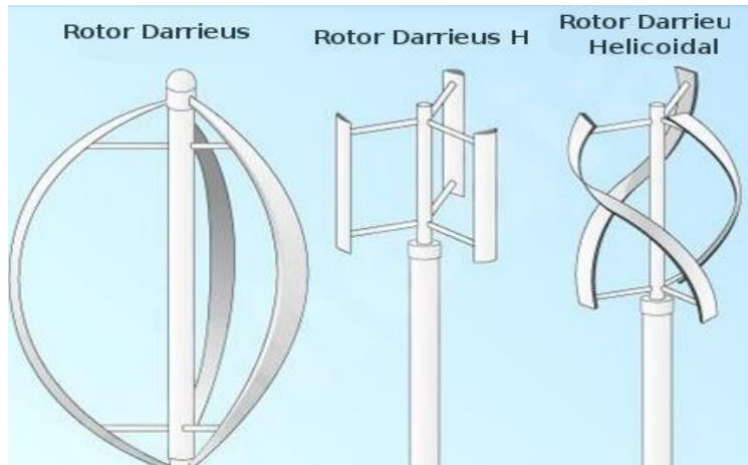


Figura 25 Turbinas de eje vertical Darrieus, híbridos y modificaciones *Fuente: Mendoza, N., Rodríguez, M. (2017). Diseño de un rotor eólico tipo Darrieus helicoidal. Journal Mechanic Engineering. ECORFAN. Vol. 1. No. 2. 34-41.*

2.3.3.3 Turbina Tipo H

Adjunto a la turbina Darrieus, el ingeniero George Jeans Mary Darrieus incluyó la patente de un rotor con las palas rectas en 1931, usando de referencia el modelo de la turbina Darrieus, por lo que su nombre correcto sería Turbina Darrieus Tipo H [1, 63, 64]. Se le da este nombre debido a la particular forma en H que tienen las palas con respecto a su eje; y hablando de sus palas, los diseños de estas tienen implicaciones interesantes; más que nada, por los comportamientos de los flujos de aire ante los diferentes perfiles aerodinámicos que se pueden instalar, y a la energía de sustentación ejercida en ellas [1, 63-65].

La energía de sustentación es la fuerza que se genera a través de un fluido sobre un cuerpo sólido cuya línea de acción está en dirección perpendicular con respecto a la corriente incidente, este principio también se puede visualizar en la ecuación 9 [65].

$$L = \frac{1}{2} \rho v^2 A C_L \quad (9)$$

Donde:

$L =$ Fuerza de sustentación (N)

$\rho =$ Densidad del fluido (kg/m^3)

$v =$ Velocidad del flujo (m/s)

$A =$ Área de contacto (m^2)

$C_L =$ Coeficiente de sustentación

De forma gráfica, se puede utilizar la figura 26 para poder apreciar los vectores de fuerza y como el principio de sustentación está presente en un perfil aerodinámico.

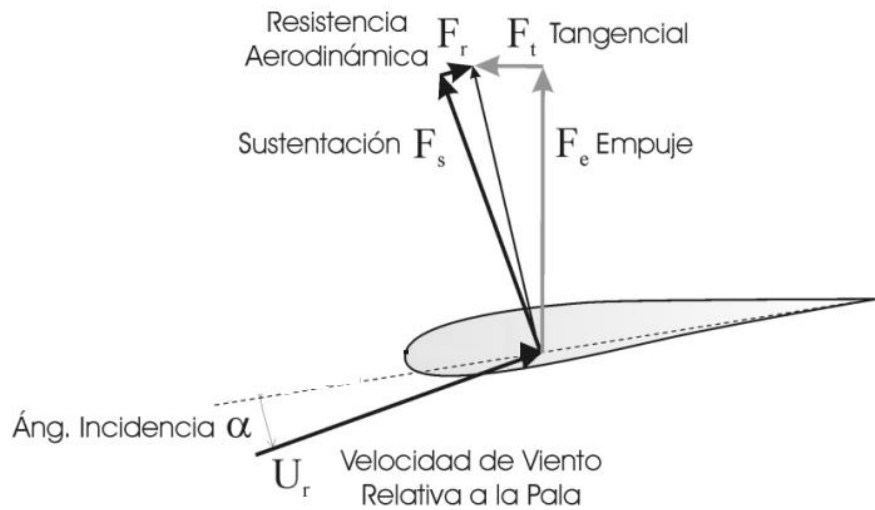


Figura 26 Diagrama de fuerzas en un perfil aerodinámico Fuente: *Funcionamiento de la turbina.* (2016). Recuperado de: <https://grupo15fluidos.wordpress.com/2016/04/24/funcionamiento-de-la-turbina/>

Ahora, en relación a las turbinas Darrieus tipo H, estas están diseñadas con dos o más alabes, sujetos directamente al eje, que; al incidir un flujo de aire sobre ella, genera un movimiento hacia su línea de acción causado por el principio de sustentación de las palas, dicho movimiento se da en una trayectoria circular limitada por la longitud de los puntales, lo que provoca diversos ángulos de ataque a los perfiles durante toda la rotación, tal y como se muestra en la figura 27 [1, 64].

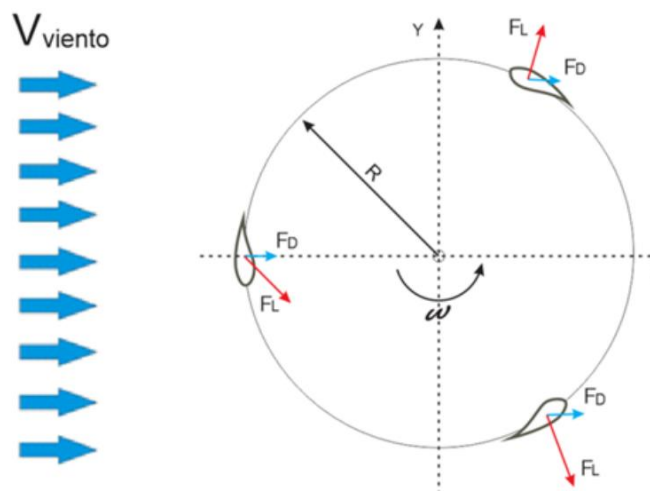


Figura 27 Diagrama de distribución de fuerzas en los perfiles aerodinámicos de una turbina Darrieus Tipo H Fuente: *Martínez, R., García, J., Urquiza, B., Basurto, M., Castro, L., Dávalos, O. Efecto geométrico de los perfiles aerodinámicos en una micro turbina eólica Darrieus tipo H. Archivos del vigésimo tercer del Congreso Internacional Anual de la SOMIM. Cuernavaca, Morelos, México.* (2017).

La energía teórica máxima que se podrá extraer de una masa de aire proviene de la ecuación de la fuerza del viento, que es análoga a la ecuación del principio de sustentación, que esta descrita por la ecuación 10 [1, 2, 64, 65].

$$F_w = \frac{1}{2} C_A \rho A v^2 \quad (10)$$

Donde:

$F_w =$ Fuerza del viento captado (N)

$C_A =$ Coeficiente de arrastre

$\rho =$ Densidad del fluido (kg/m^3)

$A =$ Área de contacto (m^2)

$v =$ Velocidad del flujo (m/s)

Usando de referencia las ecuaciones 9 y 10, se puede desglosar la expresión que describe la potencia máxima que se puede obtener de la rotación de la turbina, esta ecuación esta descrita en la ecuación 11 [1, 2, 64].

$$P_i = \frac{1}{2} C_A \rho A v^3 \quad (11)$$

Donde:

$P_i =$ Potencia maxima que se puede extraer o potencia incidente

La potencia incidente corresponde fundamentalmente a la totalidad de energía que es capaz de generar la turbina de forma idónea, no obstante, la turbina constituye a todo un sistema de conversión de energía cinética a eléctrica; por lo que es congruente tener en cuenta que habrá perdidas aerodinámicas, mecánicas y eléctricas en el potencial de energía que tendrá el sistema [1,2, 64, 65, 89], tal y como esta descrita por la ecuación 12.

$$P_G = \eta_a \cdot \eta_m \cdot \eta_e \cdot P_i \quad (12)$$

Donde:

$P_G =$ Potencia generada (W)

$\eta_a =$ Eficiencia aerodinámica

$\eta_m =$ Eficiencia mecánica

$\eta_e =$ Eficiencia eléctrica

$$P_i = \text{Potencia incidente (W)}$$

De forma más gráfica, puede observarse la transformación de estos tres tipos de energía en la figura 28.

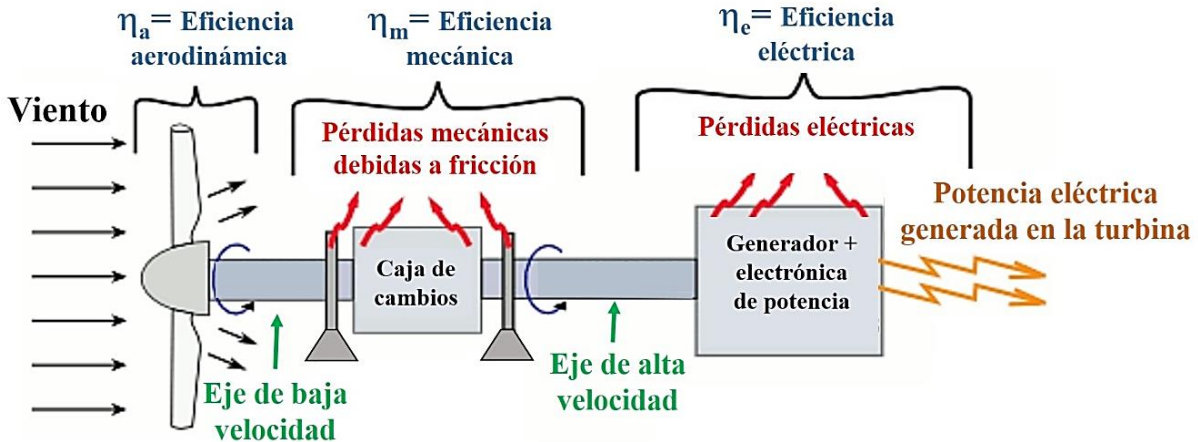


Figura 28 Esquema de las diversas transformaciones de energía del sistema de generación eólica *Fuente: Mártel, I. Las bases científicas de la energía eólica. (2018). Obtenido de: <https://blogs.publico.es/ignacio-martil/2018/07/06/las-bases-cientificas-de-la-energia-eolica/>*

Continuando con el comportamiento dinámico de la turbina, otro parámetro a tomar en cuenta es la Relación de Velocidad de Punta o TSR por sus siglas en inglés, representado por la letra griega Lamda (λ) y consiste en la tasa de aceleración del perfil con respecto a la velocidad del viento [1, 2, 3, 64, 65]. La ecuación 13 describe el TSR de una turbina eólica.

$$\lambda = \frac{v}{V} = \frac{wR}{V} \quad (13)$$

Donde:

λ = Tri Speed Ratio o Relación de Velocidad de Punta

v = Velocidad lineal de la turbina (m/s)

V = Velocidad lineal del viento (m/s)

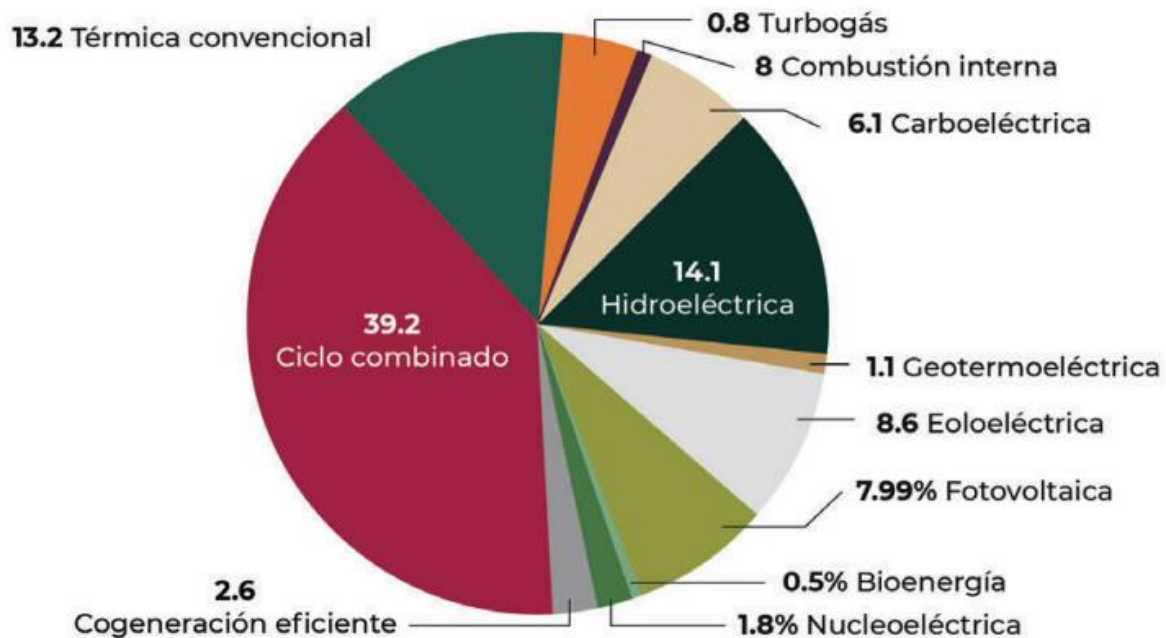
w = Velocidad angular de la turbina (rad/s)

Dependiendo de esta relación, su diseño y sus características geométricas, se pueden obtener los coeficientes de potencia de las turbinas, representado con anterioridad en la gráfica 1.

2.4 Capacidad de energía sustentable en México

Según la SENER en un estudio del 2019, de toda la capacidad de generación eléctrica conectado al Sistema de Potencia de México, el 69.86% son por quema de combustibles

fósiles, ciclos combinados y nucleoelectricas, que producen grandes cantidades de emisiones de carbono y sustancias que degradan la integridad de la capa de ozono, mientras que el otro 30.14% corresponde a los medios de generación sustentable [1, 2, 8]. En México, hay cinco medios de generación de energía eléctrica por medios sustentables. Cuatro de forma general, que corresponden a los medios eólicos, fotovoltaicos, hidroeléctricos y geotérmicos; todos ellos conectados directamente como generadores del sistema eléctrico nacional y aportando corriente a sus respectivas cargas [1, 2, 8]. El quinto es de la índole de generación distribuida a nivel industrial, que corresponde a la energía a través de la biomasa, siendo más específico; al uso de biodigestores para hacer girar una turbina que transforma la energía cinética en energía eléctrica y así contribuir a la alimentación de una planta o fábrica. Sin embargo, todas ellas presentan inconvenientes energéticos, lo que reduce su fomento de instalación [1, 2, 8, 30, 32, 67, 68]. En la Gráfica 2 se puede apreciar el porcentaje de capacidad instalada en México por tipo de tecnología a mediados del 2021 [18].



Gráfica 2 Porcentaje de capacidad instalada por tipo de tecnología en México 2021 *Fuente: Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2021-2035. Secretaría de Energía. (2021). Recuperado de: <https://www.gob.mx/sener/articulos/programa-para-el-desarrollo-del-sistema-electrico-nacional>*

Ya sea por sus bajas eficiencias de los sistemas de generación sustentable o la gran confianza y sostenibilidad del ciclo combinado, las nucleoelectricas, etcétera; la República Mexicana está arraigada a la dependencia de los sistemas por quema de combustibles fósiles, siendo notorio no tan solo por la capacidad de generación instalada, sino también en la cantidad de potencia eléctrica generada. En la tabla 4 se puede apreciar la cantidad de Gigawatts-Hora que han tenido las diferentes tecnologías de generación de Comisión Federal de Electricidad (CFE) y los Productores Independientes de Energía (PIE) en México de forma mensual en los últimos años [67, 68].

Tabla 4 Mw generados por tipo de tecnología en México en enero del 2022 *Fuente: Sistema de Información Energética. Secretaría de Energía. Dirección General de Planeación e Información Energética. Generación bruta de energía (Gigawatts-Hora) por tecnología. México. (2022) Consultado en: <https://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=cuadro&cvecua=IIIA1C05>*

Descripción	MWh	REALES-MENSUAL
		Ene/2022
Total		17,240,848.360
Termoeléctrica		12,927,660.170
Vapor		1,014,139.860
Ciclo combinado		11,299,713.570
CFE		3,680,774.910
PIE 1		7,618,938.660
Turbogas		518,572.130
Combustión interna		95,234.610
Dual		N/D
Carboeléctrica		1,165,295.860
Geotermoléctrica		399,770.010
Nucleoeléctrica		993,559.200
Eólica		215,322.770
CFE		5,888.220
PIE 1		209,434.550
Hidroeléctrica		1,538,767.380
Fotovoltaica		472.970

Nótese en la tabla 4, como los métodos de generación sustentable (eólica, hidroeléctrica, fotovoltaica y geotérmica) solo corresponden a 1,944,898,580 MWh de generación, lo que representa apenas el 11.28% de toda la oferta energética instalada en México [67, 68]. Es innegable que estos métodos de generación son de baja eficiencia o que requieren una gran infraestructura y coordinación para operar óptimamente, pero rezagarlas como servicios anexos secundarios no es una solución definitiva, aun mas considerando lo precario que es la situación climática actual y la integridad de la capa de ozono [1, 2, 8, 18]. Cabe aclarar que la tabla 4 no considera a los consumidores, ya sean domésticos o industriales, que cuentan con sistemas de generación distribuida.

A pesar de solo representar el 30.14% de toda la capacidad instalada y el 11.28% del total de la generación eléctrica de la república, México no desprecia intencionadamente los sistemas de generación de energía sustentable, solo las implementa de forma incorrecta en la mayoría de los casos a la hora de compensar sus bajas eficiencias, incluso llegan a haber casos en los que la propia instalación de estos termina siendo incongruente al coexistir con los entornos, ya que se supone, los sistemas de generación sustentable deben ser amigables con su medio

ambiente. He aquí el mayor conflicto de intereses de estos medios de generación de energía, la sostenibilidad del sistema de potencia contra su sustentabilidad, que no es un problema propio del país de México, pero no se puede negar que la república mexicana ha optado por rezagar los sistemas de generación sustentable a un segundo plano, cuya solución general para poder compensar sus intermitencias y su baja eficiencia es ampliar las áreas de captación; turbinas eólicas con palas cada vez más grandes, placas fotovoltaicas de áreas enormes, parques de generación inmensos ocupando cada vez más metros cuadrados de terreno, etcétera; que repercute en el desplazamiento de la flora y fauna de la región de forma permanente, reduciendo aún más el sentido sustentable de un parque “sostenible” con intermitencias energéticas que apenas si logra aprovechar el 30% de la energía que capta [1-5, 8, 9, 18, 67, 68].

2.4.1 Energía eólica en México

De los cinco métodos de generación sustentable adoptados por la ingeniería mexicana, la investigación se centrará en el panorama de la energía eólica, ya que, aunque todos tengan el mismo objetivo, dadas las diferentes características de cada uno de estos, se han gestionado e instalado de forma muy distinta y amplia.

Previamente en los Antecedentes del Capítulo II, se hablo acerca de cómo se introdujeron los medios de generación eólica a través de la puesta en marcha del parque de la Venta en 1994, y de cómo este dio pie a la instalación de todo el corredor eólico en el Istmo de Tehuantepec, al punto de que se convirtieron en un punto de referencia para el resto de los parques eólicos de la república mexicana, dependiendo del potencial que tiene cada región de México [30, 32]. En la tabla 5 se muestra el potencial de energía eólica presente que se tiene registrado en cada zona de México [5].

Tabla 5 Potencial de generación eólica en México 2018 *Fuente: Barrera, J., Jurado, F., Razo, J., González, R. Aerogenerador de eje vertical para aplicaciones In-situ. Análisis y modelado de un aerogenerador de eje vertical. Innovación y sustentabilidad Tecnológica. Instituto Tecnológico de Misanthla.*

Zona	Rango de potencial de energía eólica en MW
El sur del Istmo de Tehuantepec	2,000 - 3,000
Península de Baja California	1,500 - 2,500
Península de Yucatán	1,000 - 2,000
Zacatecas	800 - 1,500
Costa del Pacífico	1,000 - 1,500
Costa del Golfo de México	1,000 - 1,500

Ya con los estudios de potencial eólico y las referencias del corredor eólico en el Istmo de Tehuantepec, se comenzaron a gestionar e instalar parques eólicos más relevantes de México a partir de 1995, cuyos rangos de generación señalados en la figura 2 (página 15) aportaban carga como generadores al Sistema Eléctrico de Potencia [30, 32]. Sin embargo, aun con todo el potencial pronosticado y los enormes parques eólicos instalados alrededor del territorio

mexicano, la generación de energía eólica apenas si representa el 11.28% de toda oferta instalada.

Dadas las grandes demandas de consumo, las intermitencias de la energía sustentable y las bajas eficiencias de las turbinas; los parques eólicos no poseen la capacidad de potencial energético suficientes para satisfacer las cargas que se necesitan, así que, para poder solucionar esta problemática sin renunciar a estos sistemas de generación eólica, pero sin rezagarlos dadas sus características; México y muchos países del mundo implementa un sistema alternativo de generación no centralizado: la Generación Distribuida.

2.5 Generación Distribuida

Consiste en un sistema de generación de energía eléctrica con una o varias fuentes (no necesariamente de índole sustentable) cuya principal característica es que estas mismas fuentes están en puntos cercanos al centro de consumo.

Cuando se habla de un sistema de Generación Distribuida (GD), no necesariamente se refiere a un medio de generación que genera el propio consumidor, ya que pueden existir sistemas de GD que no estén estrictamente bajo el control del propietario de la carga, puede incluso haber servicios de GD contratados por empresas o residencias por parte de alguna entidad comercializadora participante del Mercado Eléctrico Mayorista [69]. En la figura 29 se puede observar un esquema de cómo se compone la generación distribuida.

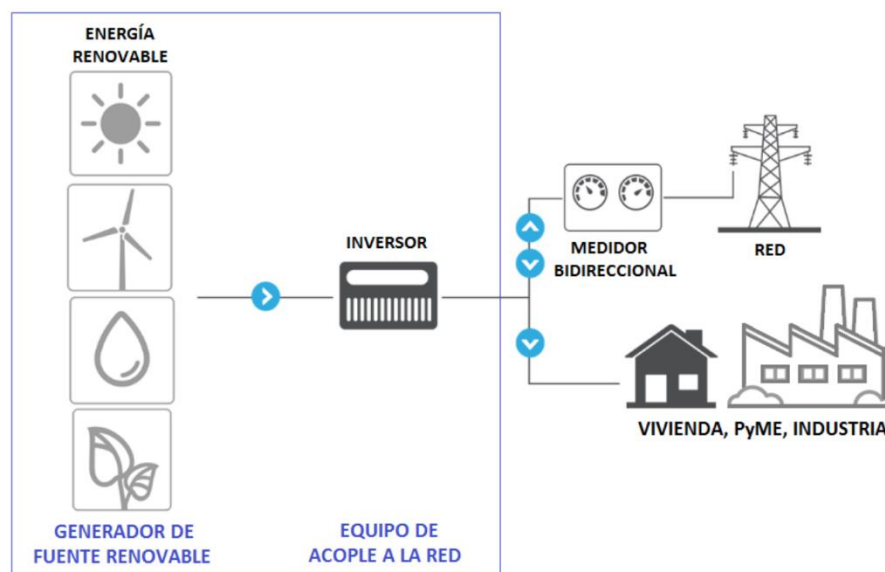


Figura 29 Esquema acerca de la composición de un sistema de Generación distribuida *Fuente: Equipo para Generación Distribuida. TEDLE. (2019). Consultado en: <https://www.tedle.net/index.php/introduccion-2/>*

Nótese en la figura 29, como es que las diferentes fuentes del diagrama de GD son de tipo sustentable, ya que, dada la característica de que la fuente debe estar a una distancia remota a la carga y la relativa facilidad con la que se instalan las placas fotovoltaicas y las pequeñas turbinas eólicas; muchos ingenieros han integrado la idea de que las fuentes del GD siempre

son de generación sustentable. Otro punto a destacar en el esquema anterior es el inversor de corriente, dado que muchos sistemas de generación eléctrica se rigen bajo el principio de funcionamiento de una máquina síncrona, por lo para ciertos tipos de fuentes o instalaciones será innecesario este dispositivo, sin embargo, algunas fuentes de energía como la fotovoltaica, ya genera corriente directa y, por lo tanto, si es necesaria la aplicación de un inversor; todo depende de cómo se plantee el sistema GD. De forma adicional, observe como tras el inversor, la dirección del diagrama se bifurca entre la carga de la vivienda-industria y la aportación a la red eléctrica; esto es porque algunos sistemas de GD, aparte de alimentar las cargas remotas a las que está conectada, al no poseer un banco de baterías (en caso de contar con alguno, tomarlo en cuenta para la instalación de inversor) y poseer una potencia por encima de la demanda, optan por ofrecer un aporte al sistema centralizado de energía.

Existen muchos sistemas de Generación Distribuida instalados en varios puntos urbanos y rurales del mundo, que cuentan con incluso, más de una fuente sustentable para alimentar el sistema; sin embargo, como se mencionó anteriormente, por motivos de la investigación, este se centrara en los de índole eólico. En la figura 30 se puede observar un esquema general de un sistema de GD impulsado por una turbina eólica de eje vertical, conectado en paralelo a la carga (o la red, en caso de desearlo así) y un banco de baterías [71].

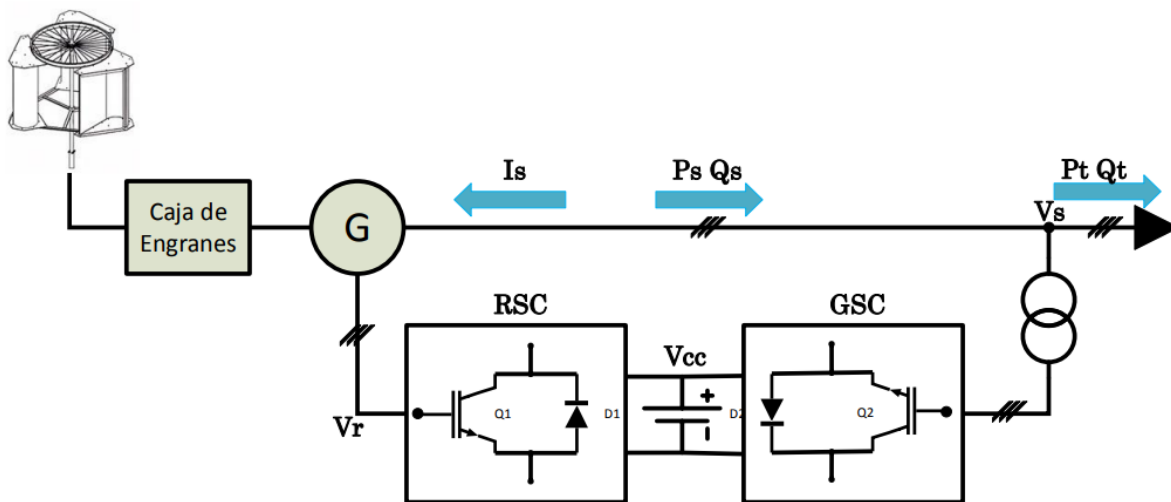


Figura 30 Esquema general un sistema GD impulsado por una turbina eólica *Fuente: Grupo de tribología y transporte, Facultad de ingeniería, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla; Visio 2016. (2022).*

Donde:

G: El generador eléctrico.

RSC: Rotor Side Converter (o Convertidor del Lado del Rotor).

GSC: Grid Side Converter (o Convertidor del Lado de la Red).

Vcc: Voltaje de corriente continua, correspondiente al banco de baterías.

Vr: Voltaje residual.

Vs: Voltaje generador por el sistema.

Is: Corriente del sistema.

Ps Qs: Potencia activa y reactiva generada por el sistema GD.

Pt Qt: Potencia activa y reactiva de la carga.

Entre los puntos a destacar del diagrama de la figura 30, posiblemente la conexión paralela con los convertidores y el banco de baterías sea la interacción eléctrica más relevante del circuito; ya que como las turbinas eólicas generan energía a través de la rotación de una máquina síncrona, la señal eléctrica en las terminales será de índole senoidal; es decir, CA, lo que implica que si se desea almacenar la energía restante del sistema, es necesario un rectificador de corriente para convertir la CA del generador en CD, energía capaz de almacenarse en un banco de baterías electroquímicas que, en caso de ser necesario, fluirá a través de un inversor de corriente para ser capaz de regresar al circuito principal y alimentar las cargas a las que está conectada el sistema de GD [69-71].

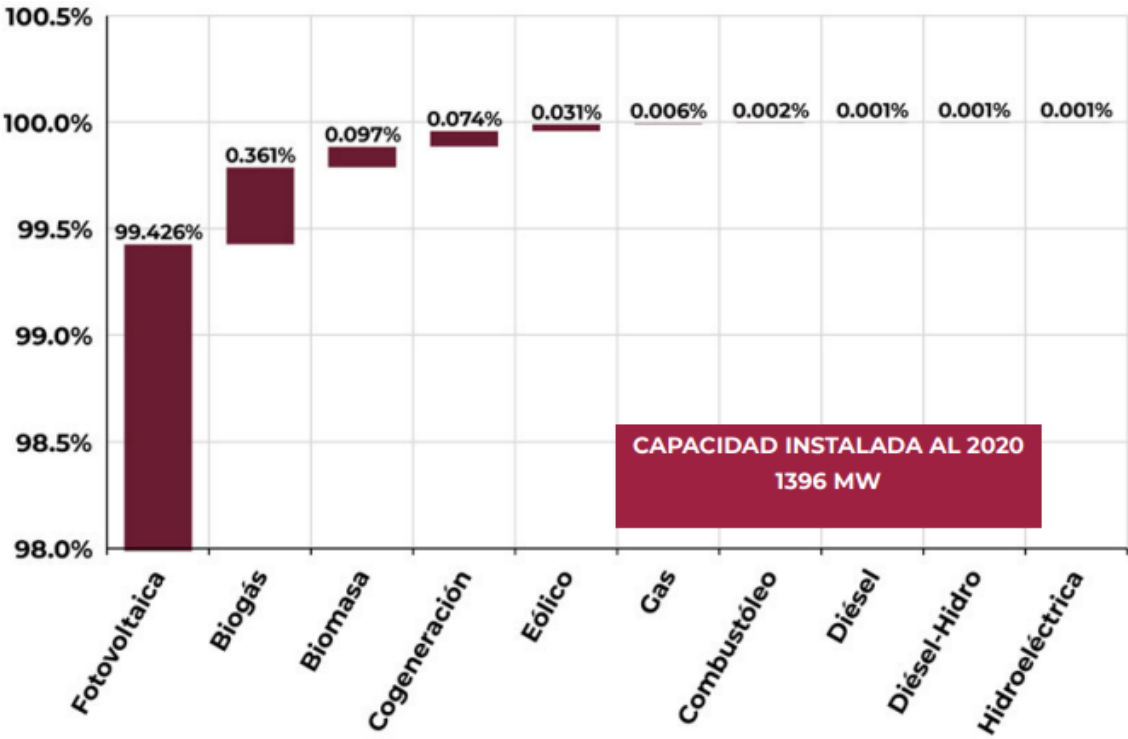
Ahora, siendo más explícito con el diagrama de la figura 30, las demás interacciones del sistema de GD aportan un funcionamiento esencial a todo el circuito. En el párrafo anterior, se mencionó la utilidad de la rama de almacenamiento conformados por el rectificador, el banco de baterías y el inversor de corriente, que generalmente ya vienen integrados en convertidores DFIG (Generadores de Inducción Doblemente Alimentados por sus siglas en inglés) en caso de contar con un generador asíncrono, o en algunos convertidores RSC Y GSC, dependiendo de los dispositivos con los que cuenten y de qué lado del banco estén [71]. Además, recordemos que en los temas anteriores se mencionó que el generador debe primero funcionar como motor eléctrico para que la turbina sea capaz de arrancar (I_s), por lo que, durante las intermitencias, el generador absorberá una cierta cantidad corriente de la red para poder ser capaz de arrancar la turbina y así, cuando el rotor sea excitado lo suficiente por los flujos de viento, se cambien los papeles de motor a generador y ahora sea este el que alimenta a la red y, por lo tanto, a las cargas del sistema GD [1-6, 9-12, 49-56, 71]. Finalmente, solo queda la energía suscitada por el generador en dirección a las cargas, representadas por las letras “P” y “Q” en la figura 29 [71].

2.5.1 Generación Distribuida en México

En México, como en casi cualquier país que haya adoptado los sistemas de GD como medio alternativo de generación, implementa estas instalaciones bajo dos vertientes, una que podría decirse que es semi-centralizada, ya que, aunque su principal objetivo es alimentar sus cargas remotas, tras cubrir su demanda, su diseño de circuito le permite ofrecer una pequeña aportación al Sistema Eléctrico de Potencia generalmente instalado por alguna dependencia eléctrica gubernamental bajo el esquema de una Red Inteligente. La otra corresponde a un sistema eléctrico aislado, implementado por residencias domésticas y empresas, cuyo único

objetivo es alimentar las cargas las que está conectada la instalación y, en caso de ser posible, almacenar la corriente sobrante a través de un banco de baterías y el uso de convertidores, tal y como se muestra en el diagrama de la figura 30.

Haciendo referencia a la Gráfica 2, correspondiente al porcentaje de capacidad instalada por tipo de tecnología en México (página 46), también se tiene una estadística realizada por la CRE y CENACE acerca de la capacidad instalada de los sistemas de Generación Distribuida conectada al SEP, mostrada en la Gráfica 3 [18].



Gráfica 3 Porcentaje de capacidad instalada de los sistemas de GD conectado al SEP, divididos por tipo de tecnología registrado en México 2020 Fuente: Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2021-2035. Secretaria de Energía. (2021). Recuperado de: <https://www.gob.mx/sener/articulos/programa-para-el-desarrollo-del-sistema-electrico-nacional>

Nótese en la Gráfica 3 como es que los sistemas de GD conectados al SEP apenas si tienen la capacidad de generar 1396 MW, lo que significa que apenas representan una ínfima parte de toda la capacidad, incluso si se compara con el mes de menor generación de potencia del 2020 (diciembre), tal y como se muestra en la tabla 6 [18, 67, 68]. Esto repercute en que, si los grandes parques de generación de energía sustentable están rezagados a un segundo plano, los sistemas de GD apenas si son considerados como fuentes de emergencia para las cargas del SEP. Sin embargo, esto no significa que los gobiernos de México desprecien los estudios e implementación de estos medios de energía, al contrario, en el Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN) de los últimos años, ha modelado escenarios base con todos los futuros proyectos de GD registrados en el PIIRCE (Programa Indicativo para la Instalación y Retiro de Centrales de Eléctricas), aunque es desafortunado que muchos de

estos proyectos no se llevan a cabo o se terminan retrasando dada la gran gestión y carga laboral necesaria para cumplir con; siendo pragmáticos, aspiraciones tan idealistas [18].

Tabla 6 Mw generados por tipo de tecnología en México en diciembre del 2020 *Fuente: Sistema de Información Energética. Secretaría de Energía. Dirección General de Planeación e Información Energética. Generación bruta de energía (Gigawatts-Hora) por tecnología. México. (2022) Consultado en: <https://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=cuadro&subAction=applyOptions>*

Descripción	MWh	REALES-MENSUAL
		Dic/2020
Total		15,499,676.349
Termoeléctrica		11,616,988.948
Vapor		1,236,847.741
Ciclo combinado		9,833,896.095
CFE		2,653,127.200
PIE 1		7,180,768.895
Turbogas		433,550.635
Combustión interna		112,694.477
Dual		0.000
Carboeléctrica		934,946.860
Geotermoléctrica		370,753.244
Nucleoeléctrica		589,448.600
Eólica		267,291.447
CFE		6,081.025
PIE 1		261,210.421
Hidroeléctrica		1,719,808.424
Fotovoltaica		438.826

El panorama energético de México vislumbra una precaria necesidad de proyectos de generación sustentable; la enorme dependencia a los medios de ciclo combinado nucleoeléctricas, la falta de soporte por partes de los grandes parques de energía verde y la huella de carbono que se emite nacionalmente, explica la gran carga de trabajo visualizado en las últimas actualizaciones del PRODESEN [18]. Incluso si los proyectos de GD del PRODECEN y el PIIRCE superan los recursos disponibles, su ambición demuestra cierta preocupación por generar un cambio, y esto puede visualizar mejor al observar el gran porcentaje instalado de GD correspondiente a los sistemas fotovoltaicos en la Gráfica 3 que, aunque requieran áreas de sumo tamaño para compensar su baja eficiencia, se aprecia un esfuerzo palpable por parte de los generadores y distribuidores del Mercado Eléctrico Mayorista [18, 37-40, 44, 69].

Otro punto a denotar de la Gráfica 3 son las aportaciones de parte de los sistemas de Biogás y Biomasa, generalmente atribuidas a empresas y procesadoras de alimentos que, por medio de biodigestores, han sido capaces de aprovechar los desechos orgánicos inherentes de sus procesos para que, a través de una reacción química, hacer rotar la turbina de un generador y abastecerse de energía eléctrica [18, 72]. Este sistema de GD ha demostrado ser muy prometedor por su naturaleza de aprovechar recursos residuales y su bajo impacto ambiental, desafortunadamente es muy infravalorado por las características químicas que deben poseer los entornos del biodigestor, las cuales en la mayoría de los casos solo pueden ser satisfechas por una empresa con experiencia en el ámbito, su alta inversión a corto plazo para la infraestructura del mismo y el rechazo proveniente de cargar el tanque con desechos orgánicos [72].

El resto de tecnologías de GD conectadas al SEP de México mencionadas en la Gráfica 3, no tienen mayor relevancia más allá de su aportación ya que, como se mencionó anteriormente, apenas si representan una ínfima parte de toda la capacidad instalada, y esto no incita a que sus métodos de implementación cambien demasiado, fuera de reducir la escala.

Finalmente, cabe recalcar que ambas vertientes de GD están generalmente instaladas bajo el diagrama de la figura 30 (aunque muchas de ellas prescindan de la rama del banco de baterías) y en caso de ofrecer una aportación al SEP, tienden a seguir una expansión del diagrama de la figura 29, bajo el esquema de una Red Inteligente que, con el objetivo de ser capaz de autogestionarse, cuenta con una gran cantidad de PMU's (Phasor Measurement Unit o Unidad Medidora de Fazor por sus siglas en inglés) para mantener el control de la red [73-75].

2.6 El Acuerdo de París

En respuesta al gran aumento de temperatura y a la escalada en la desintegración de la capa de ozono en las últimas décadas; las naciones participantes en la Vigésima Primera Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP21) celebrada en París, Francia en 2015 concluyó en la adopción del “Acuerdo de París”, un tratado internacional jurídicamente vinculante firmado en 2016, cuyos objetivos principales son:

1. Mantener el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de 2 °C con respecto a los niveles preindustriales, y proseguir los esfuerzos para limitar ese aumento de la temperatura a 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales, reconociendo que ello reduciría considerablemente los riesgos y los efectos del cambio climático [31].
2. Aumentar la capacidad de adaptación a los efectos adversos del cambio climático y promover la resiliencia al clima y un desarrollo con bajas emisiones de gases de efecto invernadero, de un modo que no comprometa la producción de alimentos [31].
3. Situar los flujos financieros en un nivel compatible con una trayectoria que conduzca a un desarrollo resiliente al clima y con bajas emisiones de gases de efecto invernadero [31].

Llevar a cabo estos objetivos implica un gran reto, completas transformaciones económicas y sociales en cada uno de los países participantes. El Acuerdo de París funciona en ciclos de 5 años de medidas climáticas cada vez más ambiciosas; en donde las naciones involucradas presentaran sus planes de acción, conocidas como Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC por sus siglas en ingles), que consisten en la comunicación de las medidas que tomaran los países para reducir sus emisiones de efecto invernadero y sus acciones que tomaran para generar resiliencia con el fin de alcanzar los objetivos de este tratado [31, 34]. Las fechas clave del tratado se pueden apreciar en la figura 31.



Figura 31 Itinerario general del Acuerdo de París. Fuente: Chiara, M. *Se abre el periodo de firma del Acuerdo de París. Cambio climático. Diversidad biocultural y territorios.* (2016)

El Acuerdo de París también proporciona un marco para el apoyo financiero, técnico y de creación de fomento de la capacidad de las naciones que las necesitan [31].

A partir del 2024, los países involucrados informarán de manera transparente acerca de sus medidas adoptadas para poder evaluar el progreso hacia los objetivos del acuerdo y se darán recomendaciones para poder llevar a cabo planes más ambiciosos en la próxima ronda [31, 34].

2.6.1 NDC de México hasta el 2021

Como miembro de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), México ratificó el Acuerdo de París el 22 de abril del 2016, y considerando que es el segundo país de América Latina que más emisiones de carbono libera; este se comprometió a varios proyectos de generación de energía sustentable en el Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico de Potencia, cuya operación aspira a reducir la huella de carbono nacional entre un 25 y 40% para el 2030 [18, 36, 41].

En el programa de Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional presentado por México en el 2020, se exponen dos vertientes de acción para alcanzar los objetivos del Acuerdo de París; el componente de adaptación, que consiste en los compromisos a nivel social y financiero

por parte del gobierno, así como los métodos de resiliencia para exhortar a la población a ser partícipe del acuerdo, y el componente de mitigación, que comprende todos los esfuerzos de cambio de generación de energía sustentable sin comprometer la sostenibilidad del SEP, así como las transformaciones en los sectores de transporte, industrial y de tratamiento de desechos [18, 37, 38, 39].

Aunque las dos componentes del NDC México 2020 se complementan así mismas, es la de mitigación la que proyecta la mayor reducción de emisiones de carbono para el año 2030. En la figura 32 se muestra un esquema con los sectores e instrumentos en las que operara esta componente, así como las metas a 10 años en disminución de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y Carbono Negro (CN) tanto condicionales como no condicionales. También, de forma más precisa, en las figuras 33 y 34 se observan las cifras de GEI y CN que se tienen de objetivo en comparación a los valores que obtendrían si se sigue en la misma línea de emisión.

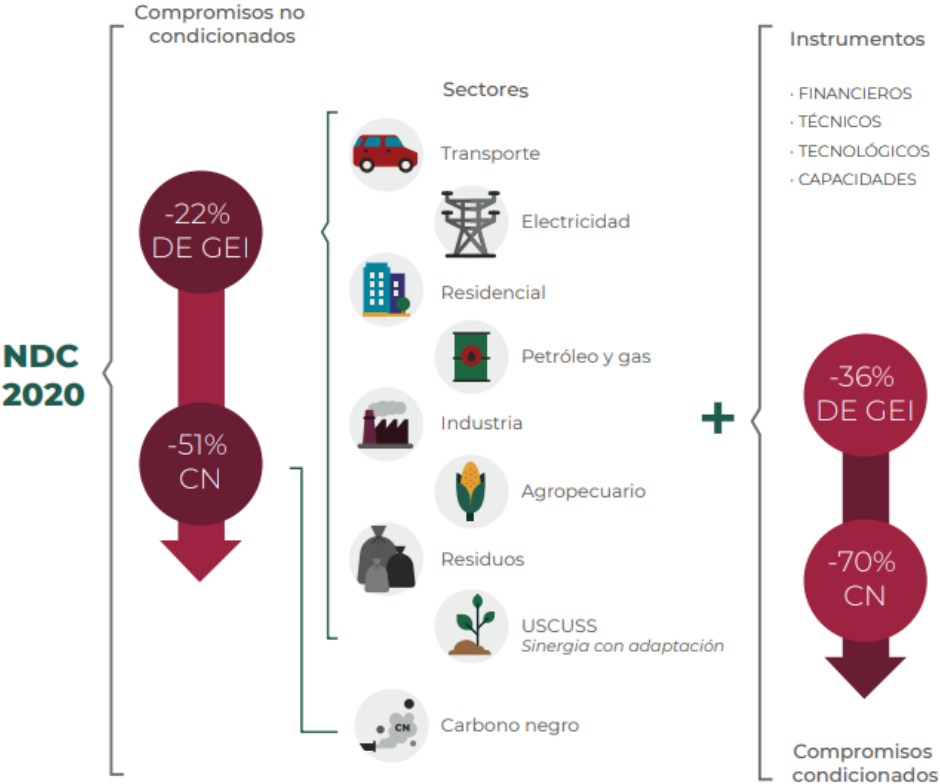


Figura 32 Esquema del componente de mitigación mostrada en la NDC 2020 de México. Fuente: *Contribución Determinada a Nivel Nacional, actualización del 2020. NDC México por el Clima. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Gobierno de México (2020).*



Figura 33 Meta de mitigación de GEI y los millones de toneladas de CO₂ no condicionados proyectados en el NDC de México. Fuente: Contribuciones previstas y determinadas (INDC). Mitigación del cambio climático. México ante el cambio. Sitio Oficial (2021).



Figura 34 Meta de mitigación de GEI y los millones de toneladas de CO₂ condicionados proyectadas en el NDC de México. Fuente: Contribuciones previstas y determinadas (INDC). Mitigación del cambio climático. México ante el cambio. Sitio Oficial (2021).

CAPITULO III. Diseño CAD

3.1 Introducción

A continuación, se expondrán las decisiones de cómo se modelo la propuesta de diseño de la turbina de eje vertical Darrieus Tipo H para alimentar el sistema de GD a partir del estudio eólico implementado en el estado de Puebla, México durante el febrero del 2021, ya que es uno de las temporadas de menor flujo de aire de la zona. Se enlistarán las condiciones psicrométricas y climatológicas del municipio de Puebla, así como los rangos de velocidad del viento que se utilizaron como muestra estadística, cuyos datos fueron capturados por los sensores de la Red Automática de Monitoreo Meteorológico 12 (RAMM-12), ubicado en el Departamento de Investigaciones Arquitectónicas y Urbanísticas de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (DIAU-BUAP).

A través del software de Solidworks 2018, se mostrarán los modelos tridimensionales de la turbina y se anexaran los planos que se generaron como referencia para su manufactura y ensamblaje.

3.2 Análisis eólico del municipio de Puebla

Mediante de los sensores del RAMM-12, se obtuvieron los siguientes datos psicrométricos y climatológicos del mes de febrero del 2021, expuestas en las tablas 7 y 8.

Tabla 7 Valores de temperaturas del año 2021 en el Estado de Puebla, México *Fuente: Red Automática de Monitoreo. Departamento de Investigaciones Arquitectónicas y Urbanísticas. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. (2021). Consultado en: <http://urban.diau.buap.mx/estaciones/ramm/noaa/NOAAPRYR.TXT>*

ANNUAL CLIMATOLOGICAL SUMMARY															
NAME: DIAU CITY: Puebla STATE: Puebla, MX															
ELEV: 2153 m LAT: 19° 02' 37" N LONG: 98° 11' 47" W															
TEMPERATURE (°C), HEAT BASE 18.3, COOL BASE 18.3															
YR	MO	MEAN MAX	MEAN MIN	MEAN	DEP. FROM NORM	HEAT DEG DAYS	COOL DEG DAYS	HI	DATE	LOW	DATE	MAX >=32	MAX <=0	MIN <=0	MIN <=-18
21	1	22.4	9.8	15.6	0.0	109	27	28.8	31	5.4	1	0	0	0	0
21	2	23.7	10.0	16.6	0.0	84	37	27.2	4	6.6	2	0	0	0	0
21	3	26.7	12.2	19.1	0.0	55	78	31.5	31	8.4	10	0	0	0	0
21	4	27.2	14.1	20.3	0.0	32	93	29.7	25	9.3	4	0	0	0	0
21	5	25.9	14.8	19.6	0.0	30	69	29.3	23	12.3	22	0	0	0	0
21	6	23.3	10.0	17.7	0.0	50	31	27.3	16	-67.8	19	0	0	2	2
21	7	25.0	13.9	18.8	0.0	41	56	27.8	25	11.3	12	0	0	0	0
21	8	25.0	14.3	18.9	0.0	38	55	29.5	19	11.6	23	0	0	0	0
21	9	24.1	14.0	18.1	0.0	47	42	29.6	21	11.9	24	0	0	0	0
21	10	24.7	13.4	18.4	0.0	49	51	30.2	15	11.7	18	0	0	0	0
21	11	24.0	9.5	16.1	0.0	100	34	27.3	11	7.1	16	0	0	0	0
21	12	24.5	9.6	16.5	0.0	97	42	28.7	24	7.7	30	0	0	0	0
		24.7	12.2	18.0	0.0	732	617	31.5	MAR	-67.8	JUN	0	0	2	2

Tabla 8 Valores de velocidad media del viento en el Estado de Puebla, México. *Fuente: Red Automática de Monitoreo. Departamento de Investigaciones Arquitectónicas y Urbanísticas. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. (2021). Consultado en: <http://urban.diau.buap.mx/estaciones/ramm/noaa/NOAAPRYR.TXT>*

WIND SPEED (m/s)					
YR	MO	AVG.	HI	DATE	DOM DIR
21	1	0.9	11.2	28	ENE
21	2	1.1	12.1	12	S
21	3	1.2	13.9	17	NE
21	4	1.3	13.9	6	S
21	5	1.2	19.7	24	SE
21	6	1.7	17.0	30	S
21	7	2.4	18.3	25	NE
21	8	0.9	20.6	30	S
21	9	2.4	20.6	18	SE
21	10	2.6	35.8	6	NE
21	11	2.4	39.3	14	E
21	12	2.2	14.3	14	NE
		1.7	39.3	NOV	S

Tabla 9 Valores de precipitación en el Estado de Puebla, México. Fuente: Red Automática de Monitoreo. Departamento de Investigaciones Arquitectónicas y Urbanísticas. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. (2021). Consultado en: <http://urban.diaa.buap.mx/estaciones/ramm/noaa/NOAAPRYR.TXT>

PRECIPITATION (mm)								
YR	MO	TOTAL	DEP. FROM NORM	MAX OBS. DAY	DATE	DAYS OF RAIN OVER		
						.2	2	20
21	1	8.0	0.0	5.8	9	2	2	0
21	2	0.6	0.0	0.6	12	1	0	0
21	3	1.0	0.0	1.0	7	1	0	0
21	4	5.6	0.0	2.2	7	4	2	0
21	5	68.2	0.0	18.0	13	18	11	0
21	6	187.0	0.0	26.8	30	23	18	2
21	7	128.6	0.0	33.8	1	14	10	2
21	8	175.2	0.0	70.2	30	14	8	3
21	9	283.6	0.0	33.6	2	21	18	5
21	10	41.0	0.0	16.8	6	10	6	0
21	11	27.0	0.0	24.4	14	3	2	1
21	12	0.0	0.0	0.0	1	0	0	0
		925.9	0.0	70.2	AUG	111	77	13

Centrándose en los datos del mes de febrero, se puede observar una temperatura media de 16.6 °c, con una lectura máxima de 23.7 °c y una mínima de 10 °c, además de una velocidad lineal del viento media de 1.1 m/s y una velocidad máxima de 12.1 m/s. También hay que destacar los datos obtenidos durante los meses correspondientes al otoño, el como en los meses de octubre y noviembre se pueden llegar a alcanzar flujos de aire de hasta 39.3 m/s. En lo que respecta a la precipitación, durante el mes de febrero solo se registró un único día de lluvia, que no sobrepasó los 0.6 mm de agua, no obstante, es imperativo resaltar las temporadas del verano y el otoño, cuyos datos de lluvia son capaces de sumar hasta 490.8 y 351.6 mm de precipitación respectivamente.

Adjunto a estos datos, se resaltaron los siguientes criterios ambientales que corresponden a la ciudad del Municipio de Puebla:

- Ausencia de cuerpos de agua.
- Dada la baja altura a la que se instalan las turbinas, no ofrecer evidencia de ubicarse en el espacio aéreo de rutas migratorias de aves ni murciélagos [75].
- Uso de suelo ya modificado.
- Riesgo mínimo de la integridad ecosistémica.
- Fragmentación consistente de los hábitats humanos con la zona urbana.
- La aptitud del medio con turbulencias beneficia sistemas alimentados por turbinas eólicas de eje vertical.

3.3 Diseño del Modelo CAD

3.3.1 Perfil aerodinámico

A partir de los datos del estudio eólico y siguiendo la metodología propuesta por el ingeniero Alfred Kalakanda [77]; primero se propuso un perfil aerodinámico que pudiese aprovechar el alto régimen de turbulencia del municipio de Puebla, cuya línea de cuerda se dibujara fuera del perfil, formado una curvatura máxima pronunciada y un borde ataque que atrapara los torbellinos de aire que captara la turbina, tal y como se muestra en la figura 35 y 36.

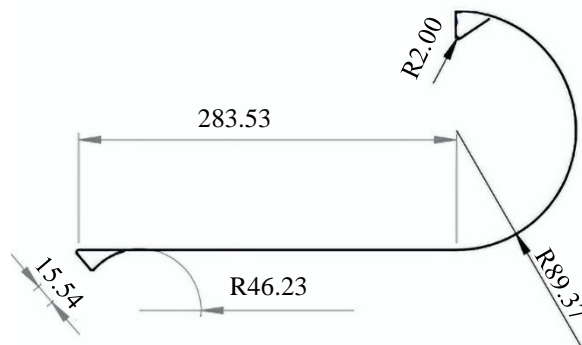


Figura 35 Diagrama del perfil aerodinámico de la turbina Darrieus Tipo H en milímetros *Fuente: García., M. Design and construction of a Darrieus vertical axis turbine and analyzed by reverse engineering. Journal Industrial Engineering. Vol. 5. No. 15. (2022).*

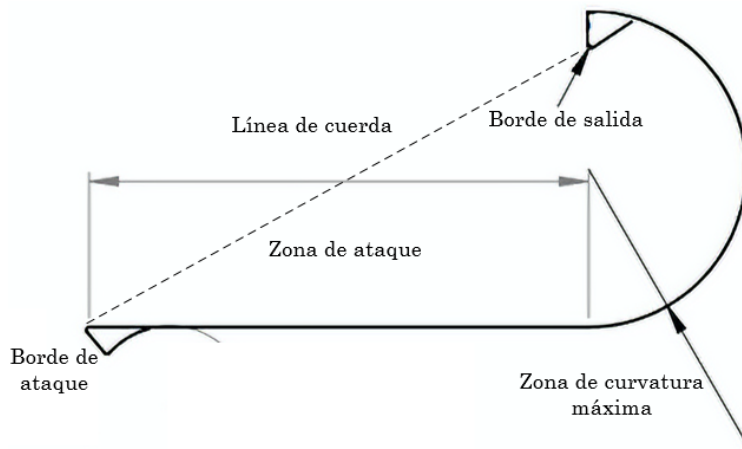


Figura 36 Parámetros geométricos del perfil aerodinámico *Fuente: Grupo de tribología y transporte, Facultad de ingeniería, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla; Visio 2016. (2022).*

Como se puede observar en el diagrama de la figura 34, el perfil propuesto no forma parte de los modelos convencionales del Comité de Asesoría Nacional de Aeronáutica (NACA por sus siglas en inglés) [76-88], ya que estos perfiles están diseñados para flujos con la menor cantidad de turbulencias posible, lo cual no es conveniente para el ambiente urbano del Municipio de Puebla.

Se planteó utilizar una placa de acero con un grosor de 26 mm, lo que corresponde al grosor del perfil de las figuras 34 y 35.

3.3.2 Modelado de la turbina

Después de determinar las características del perfil aerodinámico, se exportaron sus coordenadas al software CAD de Solidworks 2018 para diseñar el resto de la estructura. Para apoyar los planes de manufactura, se planteó utilizar una lámina de acero calibre 26 con un corte de 664 x 510 mm tal y como se muestra en la figura 36; en ella se pueden observar las curvaturas necesarias que deben aplicarse a la placa planteada para generar el perfil de la figura 34.

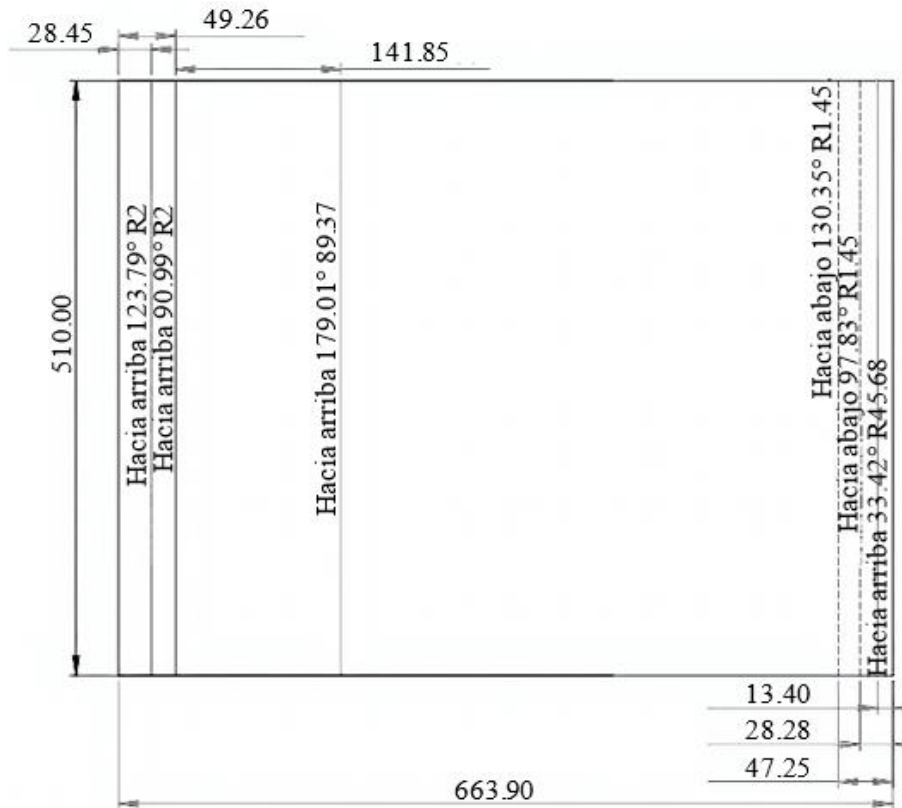
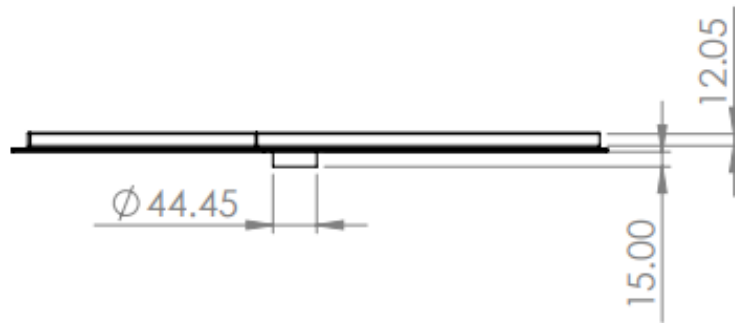


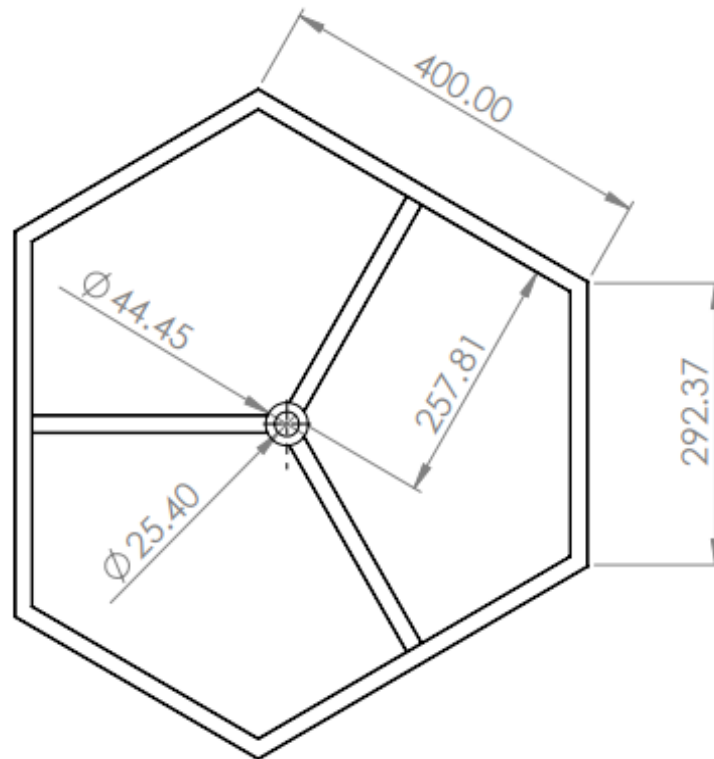
Figura 37 Plano de referencia para la manufactura de las curvaturas del alabes en milímetros *Fuente:* García., M. *Design and construction of a Darrieus vertical axis turbine and analyzed by reverse engineering. Journal Industrial Engineering. Vol. 5. No. 15. Solidworks 2018. (2022).*

Cada uno de los elementos de la turbina fueron modelados por separado y luego ensamblados para formar el modelo completo del rotor eólico. Para la base se planteó una lámina del mismo calibre con un corte de 420 x 480 mm, tal y como se muestra en la figura 38. En la siguiente lista se enumerarán los motivos por los cuales se justifican las características geométricas del diseño de la figura 38.

- Como se puede observar en la figura 38, el perfil aerodinámico este trazado sobre la base de la placa, lo que permitirá cubrir el alabe y encapsular los flujos que capte.
- Se modelo la mitad de la lámina de forma simétrica, de tal forma que al ser dividida por la mitad, puedan ensamblarse en la parte inferior y superior del alabe.
- Para evitar bordes perpendiculares en los bordes de ataque de la base, se realizaron cortes cuyos ángulos obtusos optimizaran el comportamiento aerodinámico de la turbina.
 - Un corte con un ángulo de 33° y a 54.66 mm de la línea de acción del centro de la lámina, cuya parte de la base corresponde a la zona no ocupada del perfil.
 - Un corte con un ángulo de 128.35° a 364.95 mm desde el vértice superior izquierdo de la figura 38.
- Se generaron barrenos con un diámetro de 4 mm, correspondientes a tornillos de 5/32 para poder permitir el ensamblaje.



(a)



(b)

Figura 39 Base soldada C balero, a) vista frontal, b) vista superior *Fuente: Grupo de tribología y transporte, Facultad de ingeniería, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla; Solidworks 2018. (2021).*

A través del modelo de un rin de bicicleta con un diámetro exterior de 26 cm de radio se le ofreció rotación a la turbina por la parte superior, permitiendo generar el ensamble de la turbina de todos los elementos anteriores, tal y como se muestra en la figura 39.

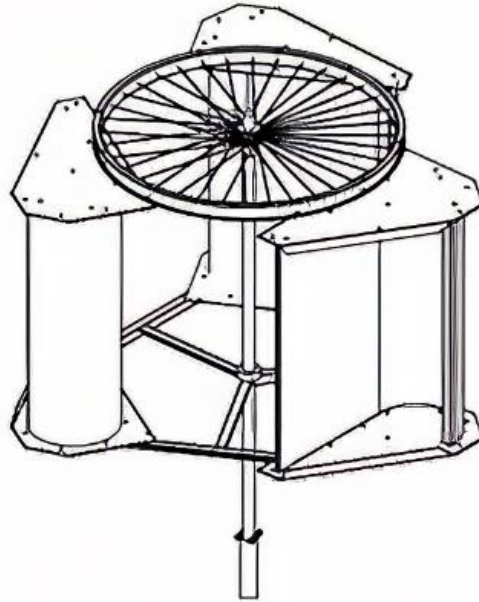


Figura 40 Modelado final de la turbina de eje vertical Darrieus tipo H Fuente: *García., M. Design and construction of a Darrieus vertical axis turbine and analyzed by reverse engineering. Journal Industrial Engineering. Vol. 5. No. 15. Solidworks 2018. (2022).*

Como se puede observar en el esquema de la figura 40, las características del modelo final de la turbina son:

- Número de alabes: 3.
- Radio exterior del rotor: 49.5 cm.
- Longitud de cuerda: 0.327 m.
- Angulo de Pitch: 0° .
- Área de contacto de cada alabe: 0.07081 m².

Hay diferentes áreas de contacto en el modelo que se pueden considerar, en este caso, se considera el área transversal dentro de la curvatura de la cuchilla.

3.3.3 Modelado del poste

Respecto al poste que sostendrá la turbina, se modelaron una serie tuberías que, al ser ensambladas, los diámetros interiores y exteriores se acoplaran respectivamente. La altura del poste es de 3.335 m, para poder permitir el libre acceso a él, ya sea al nivel de un tejado o el de un jardín. Las características geométricas del poste se pueden observar en las figuras 41 y 42.

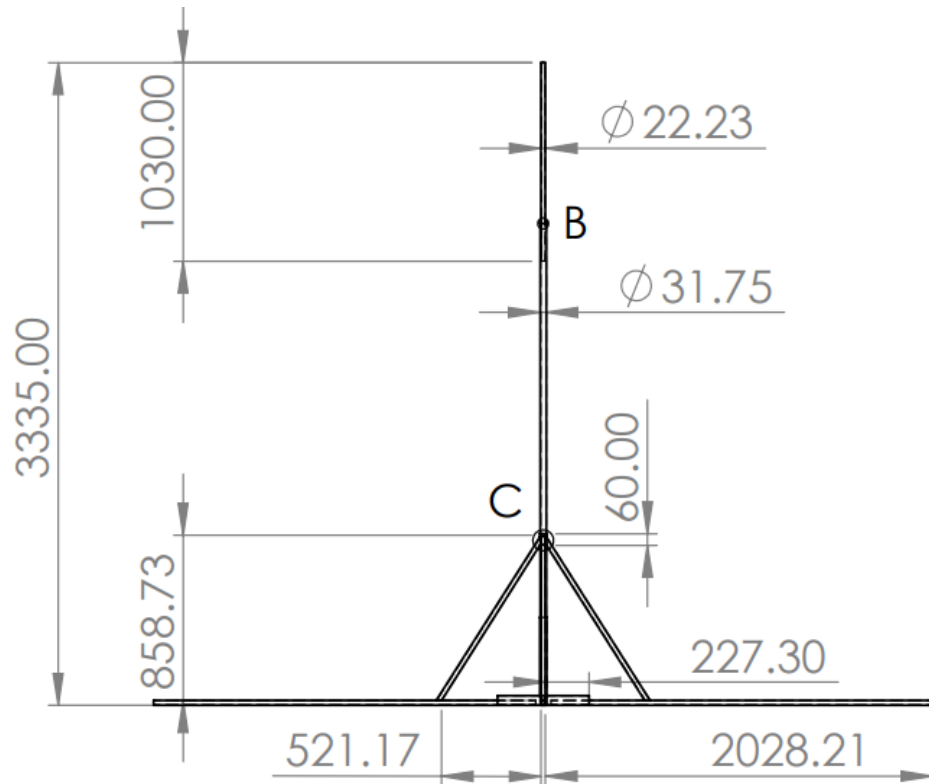


Figura 41 Planos del poste de la turbina, vista frontal en milímetros Fuente: Grupo de tribología y transporte, Facultad de ingeniería, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla; Solidworks 2018. (2021).

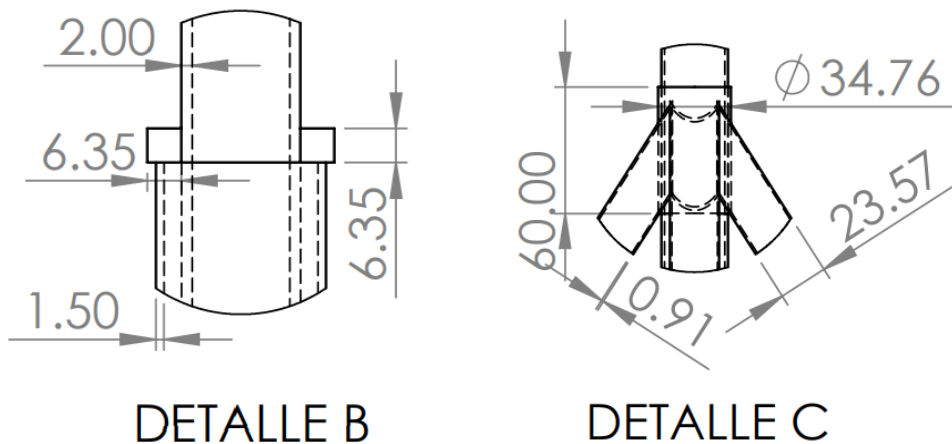


Figura 42 Detalles de las juntas del poste en milímetros Fuente: Grupo de tribología y transporte, Facultad de ingeniería, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla; Solidworks 2018. (2021).

CAPITULO IV. Análisis aerodinámico y CFD del Modelo CAD

4.1 Introducción

El objetivo global de este capítulo es; que a partir de los modelos CAD del capítulo anterior, los datos obtenidos por los sensores del RAMM-12 y las ecuaciones de gobierno correspondientes a las turbinas de eje vertical (ecuaciones 10-13), se obtengan los parámetros de operación del rotor eólico Darrieus Tipo H propuesto: Los Coeficientes de momento, potencia aerodinámica (esta última será necesaria para su sustitución en el modelo del coeficiente de la potencia generada, ecuación 12)., TSR, velocidad angular media, fuerza captada por los alabes y coeficiente de eficiencia aerodinámica

Adjunto a este análisis teórico, se exporto la geometría del modelo CAD al programa Fluent de ANSYS para realizar una simulación CFD, a través del modelo matemático K-Épsilon y la declaración de los parámetros de frontera para que concuerden con los datos del estudio eólico. De esta manera, se observó el comportamiento de los flujos de aire mientras estas excitaban la rotación de la turbina, y así, corroborar los resultados del análisis teórico.

4.2 Estimaciones

Para la realización del análisis aerodinámico, se consideraron las siguientes estimaciones y datos:

Datos del análisis eólico:

Presión barométrica: $P = 23.01001 \text{ inHg} = 77.92081 \text{ kPa}$

Densidad del aire a 25°C: $\rho = 0.90147 \text{ kg/m}^3$

Velocidad del viento lineal de muestra: $v = 8.00000 \text{ m/s}$

Características geométricas de la turbina:

Área de contacto por cada alabe: $A = 0.07081 \text{ m}^2$

Radio de exterior de la turbina: $r = 0.49500 \text{ m}$

Note como se ha seleccionado una velocidad lineal del viento de 8.00000 m/s como muestra para realizar los cálculos; esto con el motivo de simplificar las ecuaciones y considerando que es un dato que se encuentra en medio del mínimo y máximo de los vientos captados por el RAMM-12.

4.3 Coeficiente de Momento (C_M)

También conocido como el coeficiente de par, indica la relación entre el momento obtenido en la turbina con respecto al par máximo de una corriente del mismo flujo y con las mismas condiciones [76]. La expresión que describe el coeficiente de momento se puede observar en la ecuación 14.

$$C_M = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho v^2 A r} \quad (14)$$

Donde:

$C_M =$ Coeficiente de Momento

$T =$ Par en el eje de la turbina ($N \cdot m$)

$\rho =$ Densidad del fluido (kg/m^3)

$v =$ Velocidad del flujo (m/s)

$A =$ Área de contacto (m^2)

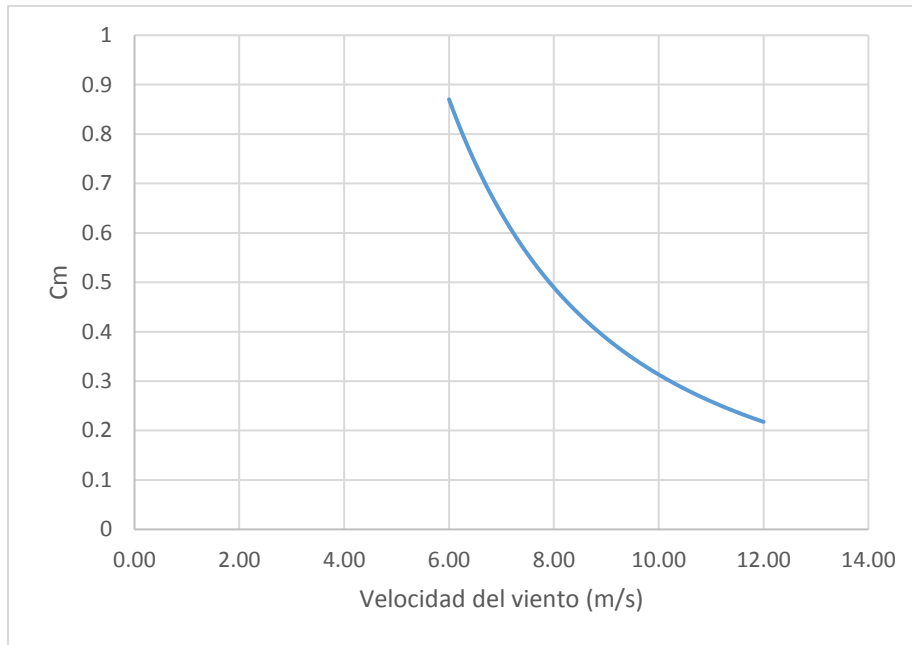
$r =$ Radio de la turbina (m)

Por lo tanto, ofreciendo una fuerza de 1 N:

$$C_M = \frac{(1)(0.49500)}{\frac{1}{2}(0.90147)(8.00000)^2(0.07081)(0.49500)} \cdot \frac{[N][m]}{[kg/m^3][m/s]^2[m^2][m]}$$

$$C_M = 0.48955$$

Por supuesto, el coeficiente de momento desarrollado arriba no es un resultado constante, sino un ejemplo de la resolución de este valor adimensional a una velocidad de 8 m/s en línea recta de los flujos del aire. Si se declara un intervalo de velocidades lineales de $6 \text{ m/s} \leq v \leq 12 \text{ m/s}$ y se sustituyeran los valores en la ecuación 14, se obtiene la curva del coeficiente de par de la turbina con respecto a la velocidad del viento, que puede visualizarse en la Grafica 4.



Gráfica 4 Curva del Coeficiente de Momento del modelo de la turbina eólica Darrieus Tipo H *Fuente:* García., M. Grupo de tribología y transporte. Facultad de Ingeniería. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. (2022).

4.4 TSR (λ) y Coeficiente de Potencia (C_p)

Siguiendo los resultados obtenidos por las investigaciones del Instituto Tecnológico de Indonesia, la Universidad de Karunya, India y el Instituto Politécnico de Valencia; las cuales pueden verse representadas en la Grafica 1 (Página 31) [76, 77, 82] y descrita por la ecuación 13; el TSR del modelo debería pertenecer a un intervalo de $3.8 < \lambda < 8.2$; no obstante, estos coeficientes de velocidad de punta solo corresponden a este intervalo si los alabes poseen las características geométricas de una VAWT Darrieus con cuchillas NACA. Por lo tanto, se obtendrán los valores de TSR a partir de evaluar las estimaciones y datos ya estipulados y graficándolos con respecto al coeficiente de potencia.

Desplegando la ecuación 13:

$$\lambda = \frac{v}{v} = \frac{wr}{v} = \frac{2\pi r}{v} \quad (13)$$

Por lo tanto, sustituyendo los las estimaciones y valores numéricos en la educación:

$$\lambda = \frac{2\pi(0.49500)}{8.00000} \cdot \frac{\left[\frac{rad}{s}\right] [m]}{\left[\frac{m}{s}\right]} = 0.38877$$

Al igual que el Coeficiente de Momento, el valor de TSR desarrollado arriba solo representa la relación de velocidad angular de la turbina con una velocidad del viento de 8 m/s . Si se desplegaran todos los posibles resultados de la velocidad lineal del viento, se obtendría la

curva de comportamiento de TSR con cualquier velocidad del viento; sin embargo, para ser capaz de obtener esta gráfica, es necesario el Coeficiente de arrastre.

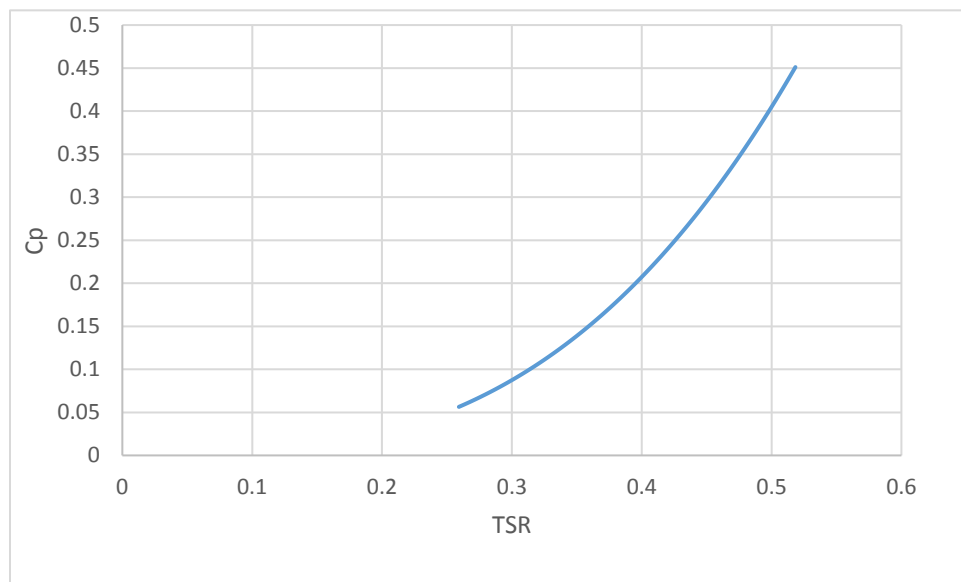
Respecto al Coeficiente de Potencia de la turbina, dada que es la relación de la potencia obtenida de la energía cinética de un fluido en comparación con la máxima potencia que se puede extraer de una corriente del mismo flujo; se puede despejar el C_p de la ecuación 11 (página 43), no obstante, ya que aún no se ha declarado una potencia incidente; se obtuvo este coeficiente a través del producto del TSR y el Coeficiente de Momento, tal y como se muestra en la ecuación 15 [76].

$$C_p = \lambda \cdot C_M = \frac{P_i}{\frac{1}{2}\rho v^3 A} \quad (15)$$

Por lo tanto, usando el TSR y C_M obtenidos anteriormente:

$$C_p = (0.38877)(0.48955) = 0.19032$$

Al evaluar las velocidades lineales del aire en un intervalo de $6 \text{ m/s} \leq v \leq 12 \text{ m/s}$ en las ecuaciones 14 y 15; se obtiene la curva de comportamiento del modelo de la turbina respecto a su Coeficiente de Potencia y TSR, tal y como se muestra en la Gráfica 5.



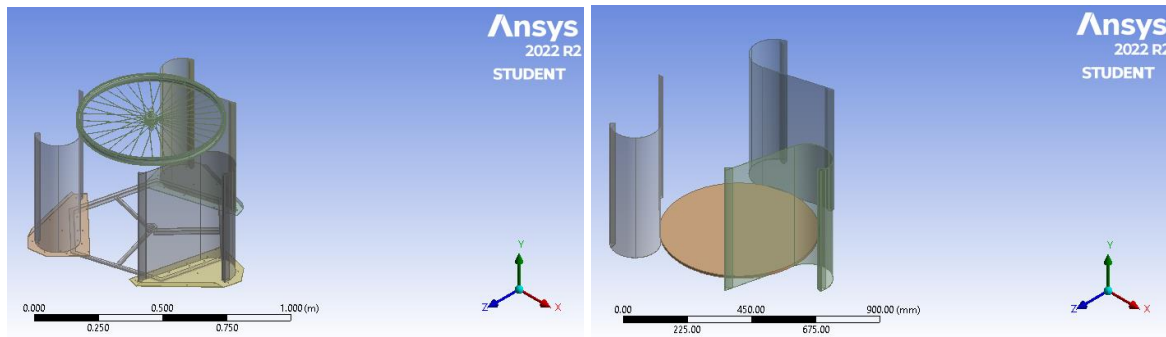
Gráfica 5 Curva del Coeficiente de Potencia con respecto al TSR del modelo de la turbina eólica Darrieus Tipo H Fuente: *García., M. Grupo de tribología y transporte. Facultad de Ingeniería, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. (2022).*

4.5 Análisis CFD

En esta sección se mencionará todo lo relacionado a la simulación CFD del modelo de la turbina con la herramienta Fluent de ANSYS 2022, así como el modelo matemático empleado, sus condiciones de frontera y sus justificaciones. Además, se llevará a cabo la interpretación de los resultados obtenidos.

4.5.1 Preparación del Modelo CAD y sus volúmenes de control

Se exportó una versión simplificada del modelo CAD al espacio de Geometría de ANSYS 2022 R2, tal y como se puede visualizar en la figura 43.



(a)

(b)

Figura 43 Modelos de la turbina exportadas al Software de ANSYS 2022 R2. Modelo original (a). Modelo simplificado (b) *Fuente: García., M. Grupo de tribología y transporte. Facultad de Ingeniería. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. ANSYS 2022 R2 (2022).*

El motivo de la simplificación es la capacidad del programa para poder llevar a cabo las iteraciones, la versión estudiantil de ANSYS 2022 R2 es capaz de desarrollar análisis de sólidos y fluidos solo si la malla del modelo no supera los 19,000 elementos y nodos.

Para poder llevar a cabo el análisis, se modeló un Enclosure, un volumen de control alrededor de la turbina que sirviera para simular los flujos de viento que fuese a captar el modelo de la turbina. También se configuró un volumen de rotación cuyo eje de giro se encontrará en el centro del modelo y permitiera la una rotación en el eje Y. Todos estos volúmenes de control se pueden observar en la figura 44.

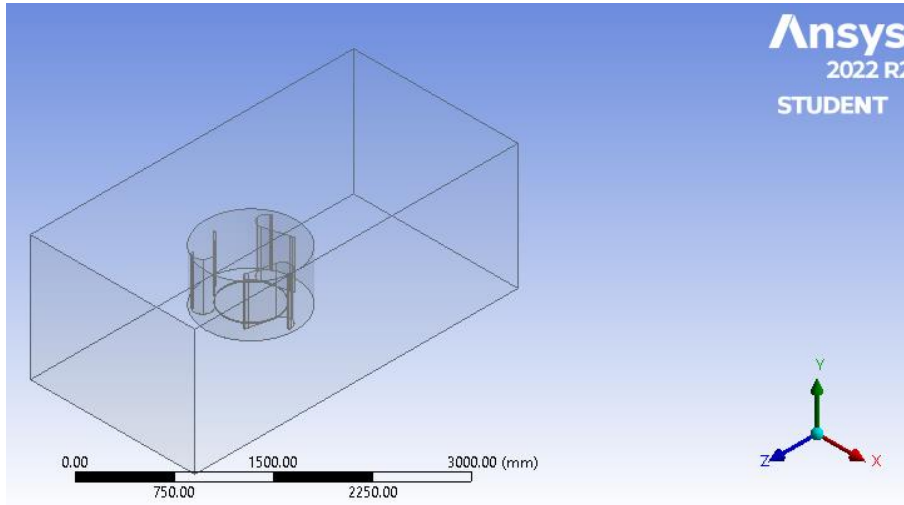


Figura 44 Volumen de control y rotación *Fuente: García., M. Grupo de tribología y transporte. Facultad de Ingeniería. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. ANSYS 2022 R2. (2022).*

También se declararon las paredes de entrada (Inlet) y salida (Outlet) del volumen de control, así como la declaración de los “Walls” u “Open”, correspondientes al resto de las paredes del Enclosure, que funcionaran como la representación de la presión barométrica del ambiente. Todas estas declaraciones se pueden observar en la figura 45.

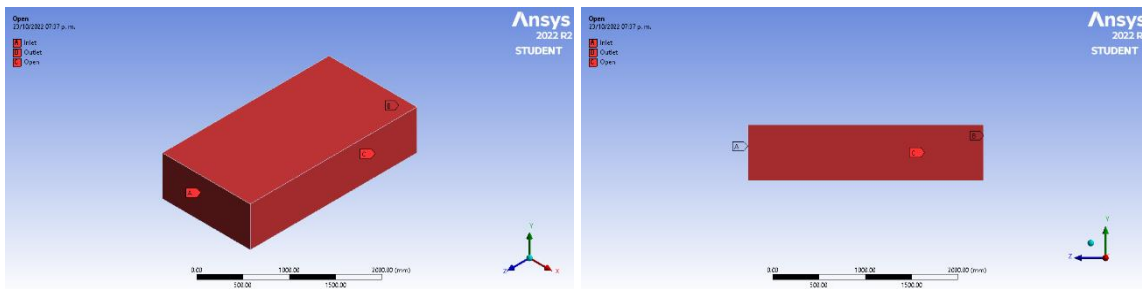


Figura 45 Declaración del Inlet, Outlet y Open del Volumen de Control. Vista Isométrica (a), Vista Frontal (b) *Fuente: García., M. Grupo de tribología y transporte. Facultad de Ingeniería. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. ANSYS 2022 R2. (2022).*

4.5.2 Mallado

Se declaró un tamaño máximo del elemento de 279.5 mm, formando una malla de 14,795 nodos y 18992 elementos, tal y como se muestra en la figura 46.

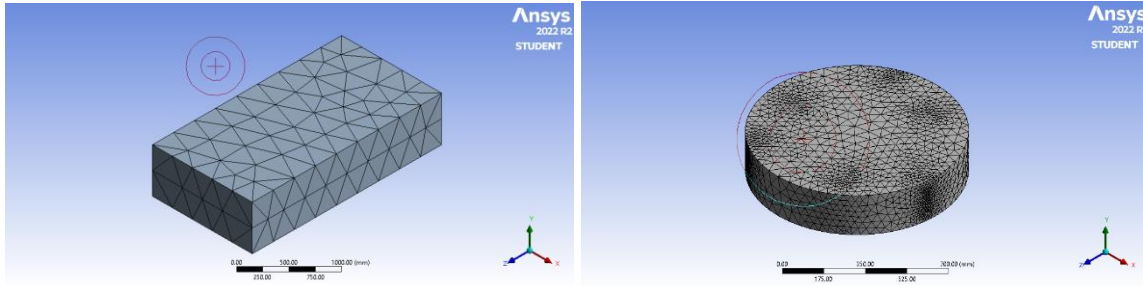


Figura 46 Mallado del modelo de VAWT Darrieus Tipo H y sus volúmenes de control. Enclosure (a), Dominio de rotación (b) Fuente: *García., M. Grupo de tribología y transporte. Facultad de Ingeniería. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. ANSYS 2022 R2. (2022).*

4.5.3 Configuración de las condiciones de frontera

Considerando el alto Número de Reynolds y el alto índice de turbulencias, se optó por la aplicación del modelo matemático K-Épsilon con las configuraciones mostradas en la Tabla 10.

Tabla 10 Configuración de los parámetros de parámetros de frontera. Fuente: *García., M. Grupo de tribología y transporte. Facultad de Ingeniería. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. (2022).*

Parámetro	Coficiente o Características
Tiempo	Transitorio
Modelo	K-ε Realizable. Funciones de pared escalabres
Materiales	Solido: Aluminio Fluido: Aire
Condiciones de las zonas de celda	Movimiento de Malla en el Dominio de Rotación. Rotación en el eje axial = Y:1 Enclosure. Entrada de fluido por parte del Inlet. V=8.00000 m/s, Z:-1
Condiciones de pared del volumen de control	Presión barométrica = 0.76902 Atm Densidad del fluido = 0.90147 kg/m ³ Temperatura = 25 °c
Desratización Espacial	Resolución de Gradiente: Basado en celdas de mínimos cuadrados Momento, Energía de Turbulencia Cinética y Tasa de Disipación turbulenta: De primer orden
Avance del tiempo durante la simulación	Número de pasos de tiempo: 100 Tamaño del paso de tiempo (s): 0.3 Iteraciones máximas/ paso de tiempo: 20

4.5.4 Interpretación y análisis de los resultados

Se generó un área en el plano XZ y se hizo pasar a través del modelo para poder observar el comportamiento del flujo y su interacción con la turbina de forma bidimensional a través de “Streamlines” y “Contornos”. Los resultados de la simulación CFD en Fluent se pueden apreciar en las figuras 47, 48 y 49.

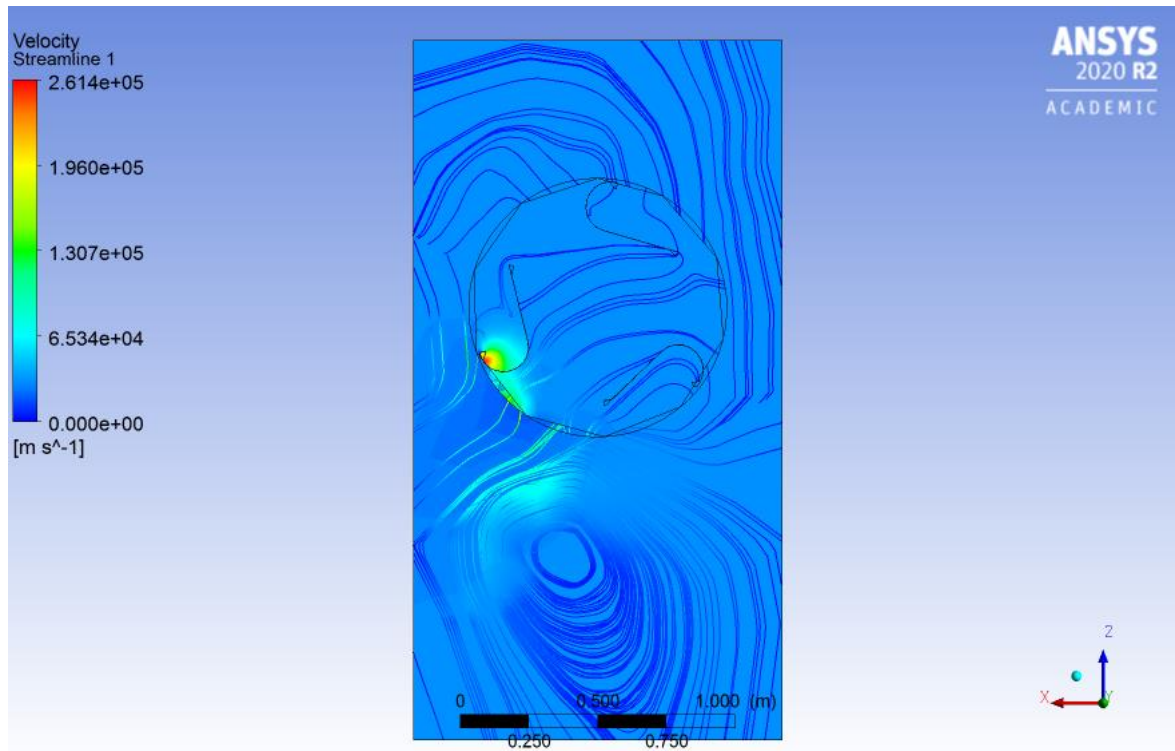


Figura 47 Velocidad de los flujos del aire al ser captada por la turbina. Tiempo de iteración de 3 s Fuente: García., M. Grupo de tribología y transporte. Facultad de Ingeniería. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. ANSYS 2020 R2. (2022).

Se puede observar en la figura 47 como le toma un tiempo relativamente largo a la turbina comenzar su rotación tras la captación del viento y el cómo este flujo de aire se atrapa en la curvatura del perfil y genera presión en ella (esto podrá visualizarse mejor en la figura 48). También hay que denotar los remolinos generados a 180 ° de la turbina tras la captación del aire, corroborando el fenómeno de pérdida de energía mencionado en el Capítulo II (Página 39); esto implica la necesidad de evitar la aglomeración ordenada de este tipo de turbinas, como si de un parque eólico se tratara; agrupar en hileras estos diseños de VAWT solo repercutirá en la captación de torbellinos de aire de, cada vez, menor energía.

La formación de remolinos de aire, tanto dentro como fuera del modelo en operación, era un hecho ya previsto, sin embargo, es pertinente analizar la dirección en la que estos torbellinos están interaccionando con la turbina, ya que no es conveniente que la energía de turbulencia cinética inherente a estos flujos de aire no sea demasiado alta en la dirección opuesta a la gira

la VAWT. En la figura 48 se puede apreciar el comportamiento y velocidad angular de los flujos de aire mientras gira la turbina.

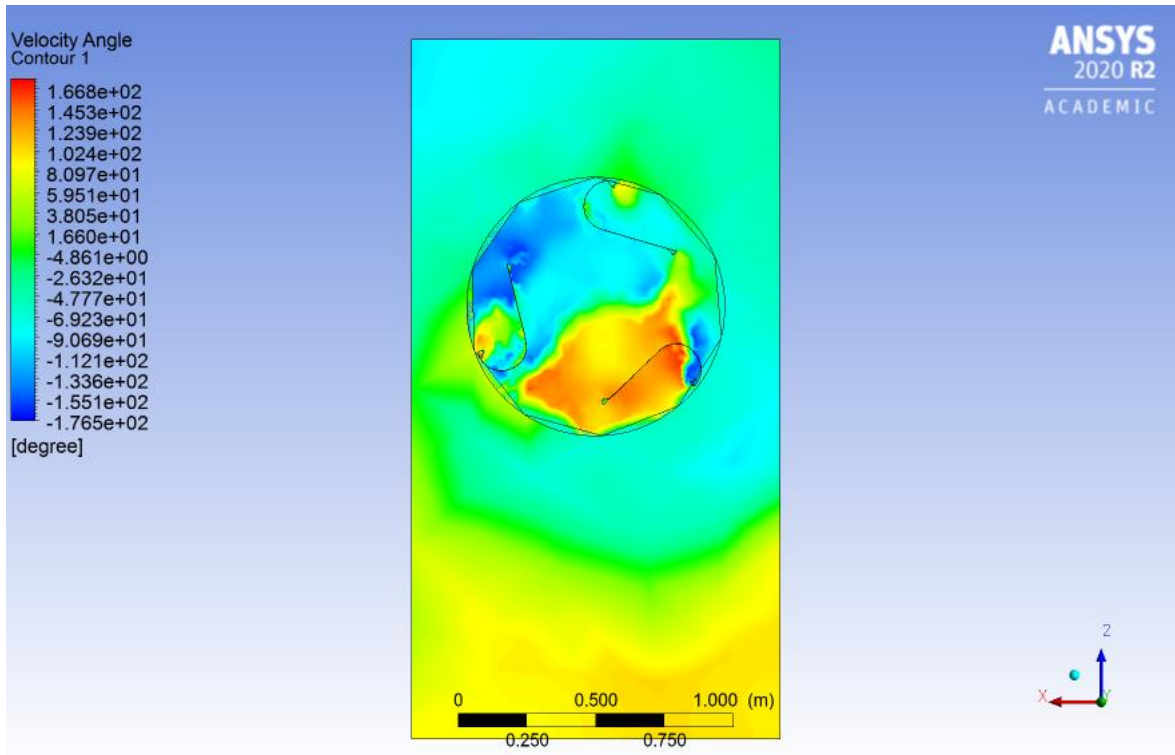


Figura 48 Velocidad angular de los flujos del aire al ser captada por la turbina. Tiempo de iteración de 3 s
 Fuente: García., M. Grupo de tribología y transporte. Facultad de Ingeniería. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. ANSYS 2020 R2. (2022).

El programa Fluent de ANSYS interpreta la velocidad angular de los fluidos de forma anti-horaria y transitoria, lo que significa que los resultados que se muestran en la figura 48 se pueden ver cómo $n = \text{Velocidad angular del aire } [^\circ]$ y si $0^\circ < n$ entonces el remolino de aire va en sentido opuesto del reloj. Esto implica que, tras la captación hay un régimen parcial de pérdida de energía por turbulencia cinética debido a torbellinos formados en sentido opuesto en los alabes, los cuales pueden observarse como las zonas azul marino del volumen de control; que ocupan un poco menos de la mitad de las interacciones con el modelo [19-21]. Entonces ¿Cómo es que este modelo de turbina VAWT es capaz de girar en el sentido en el que fue planteado si en la simulación se muestra una alta presencia de turbulencias que van en sentido opuesto? La respuesta yace en los resultados mostrados en la figura 48; se están representando los sentidos en los que giran los remolinos, mas no, con que fuerza ejercen presión sobre los alabes; por lo que se puede concluir que, aunque se tenga una presencia de considerable de turbulencias que merman la rotación de la turbina, no es contundente y apenas representan una ínfima parte de todas las fuerzas que se ejercen en el modelo [19-21].

Respecte a la presión del aire que actúa sobre los alabes, se puede observar en la figura 49 como el flujo de aire ejerce presión sobre la primera pala tan pronto ocurre la captación.

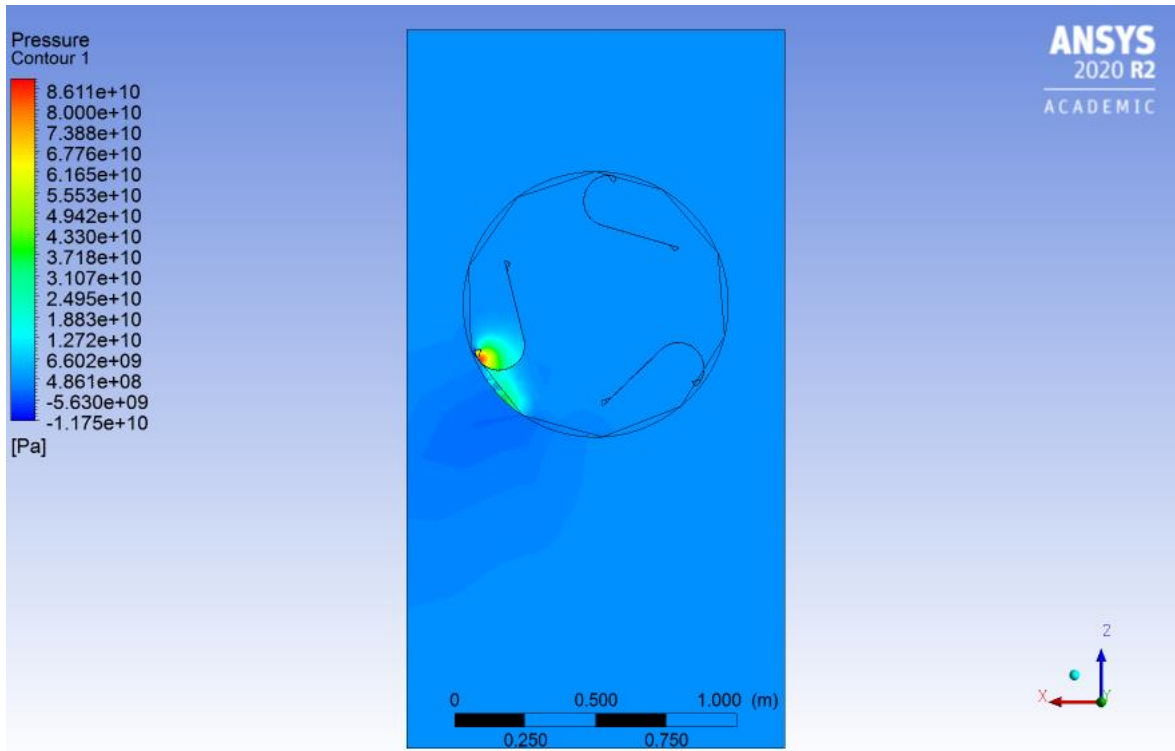


Figura 49 Presión sobre el primer alabe. Tiempo de 0 s. Tiempo de iteración de 3 s *Fuente: García., M. Grupo de tribología y transporte. Facultad de Ingeniería. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. ANSYS 2020 R2. (2022).*

Nótese como el aire presiona principalmente en el borde de salida, dado que es la zona donde los torbellinos buscaran escaparse del alabe y disiparse en el ambiente; por lo que se puede deducir que este evento se repetirá conforme el flujo de aire excite la turbina.

CAPITULO V. Construcción de la turbina Darrieus Tipo H

5.1 Introducción

A continuación, se hará una breve descripción de cómo se llevó a cabo la manufactura de los elementos de la turbina utilizando los planos del modelo CAD como referencia y como se realizó el ensamble de este siguiendo las medidas de seguridad y especificaciones mencionados en la NOM-081-SEMARNAT-1994 y NOM-001-SEDE-2005. También se mencionará la instalación de un tren de engranes que, mediante una banda, transmitía la rotación de la VAWT a un generador eléctrico de 500 W

5.2 Manufactura y ensamble de los elementos de la turbina

A través de cortes de 664 x 510 mm lámina de aluminio calibre 26 se realizaron las especificaciones indicadas en la figura 38 para llevar a cabo la elaboración de las tres palas de la turbina, tal y como se muestra en la figura 50.



Figura 50 Manufactura de las palas de la turbina *Fuente: Grupo de tribología y transporte. Facultad de Ingeniería. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. ANSYS 2020 R2. (2022).*

Una vez elaborados los alabes de la VAWT, se procedió a ensamblarlos a través de tornillos de 5/32 in al rin de una bicicleta de 26 cm de radio, tal y como se muestra en la figura 51.



Figura 51 Ensamble de un alabe al rin de bicicleta *Fuente: Grupo de tribología y transporte. Facultad de Ingeniería. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. ANSYS 2020 R2. (2022).*

Con el material sobrante se elaboraron las barras que conformarían la base baja de la turbina, las cuales se soldaron para culminar el ensamble principal del modelo. A través de una serie de tuberías cuya longitud es congruente con los modelos de la figura 41 y un balero de 44.45 mm de diámetro exterior y 25.40 mm de diámetro interior; el ensamble de estos puede verse en la figura 52.



Figura 52 Ensamble principal de la VAWT Darrieus tipo H *Fuente: Grupo de tribología y transporte. Facultad de Ingeniería. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. ANSYS 2020 R2. (2022).*

Como parte de las medidas de seguridad inherentes a las VAWT, a través de una cuerda se realizó un nudo a una altura de 2.30500 m, cuyos extremos se anclaron al suelo para brindar mayor estabilidad al rotor y reducir sustancialmente las vibraciones del poste. La cuerda tensora atada al poste de la turbina se puede observar en la figura 53.

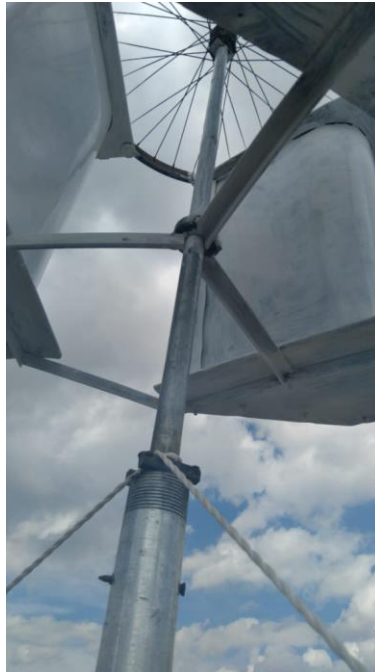


Figura 53 Cuerda tensora de la VAWT Darrieus tipo H Fuente: Grupo de tribología y transporte. Facultad de Ingeniería. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. ANSYS 2020 R2. (2022).

5.3 Selección del tren de engranes y el alternador

Dado que la turbina operara bajo el régimen de la mini-eólica, se seleccionó un tren de engranes que ofreciera el torque necesario para hacer operar un alternador de 500 W.

Se seleccionó un alternador de imanes permanentes con las siguientes especificaciones:

- Modelo: G500M2
- Tipo: Alternador monof CA
- Potencia: 500 W
- Tensiones nominales: 12/24/48 V
- Peso: 6.8 Kg
- Material: Aleación de aluminio
- Velocidad de rotación nominal: 900 RPM's
- Dimensiones: 28 x 28 x 25 cm
- Temperatura de operación: -40 a 80 °c

Considerando que la rotación media de la turbina es de 16.16161 rad/s , a través de la conversión dimensional mostrada abajo, se obtuvo la relación de transmisión que requiere nuestra caja de engranes.

$$W_1 = \frac{980 \text{ Rev}}{1 \text{ min}} \left(\frac{2\pi \text{ rad}}{1 \text{ Rev}} \right) \left(\frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \right)$$

$$W_1 = 32.66667 \text{ rad/s}$$

Desarrollando la relación de velocidades angulares, se obtiene una relación de 2; por lo que se seleccionó un tren de engranes multiplicador. Por lo que se manufacturo y ensamlo una polea horizontal con un radio de 15 cm que, a través de una banda, se acoplo a una transmisión de engranes con un radio de 7.5 cm. Esto se puede observar en la figura 54.

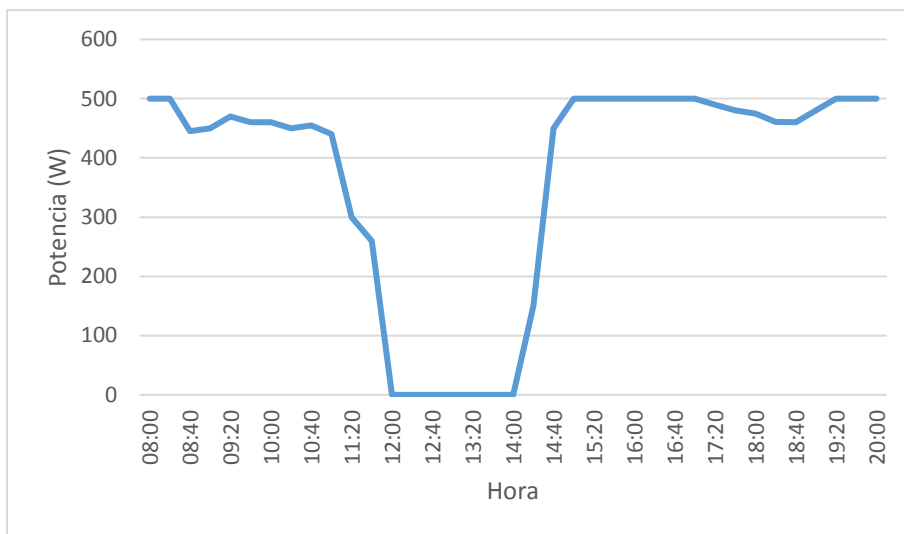


Figura 54 VAWT Darrieus tipo H Fuente: Grupo de tribología y transporte. Facultad de Ingeniería. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. ANSYS 2020 R2. (2022).

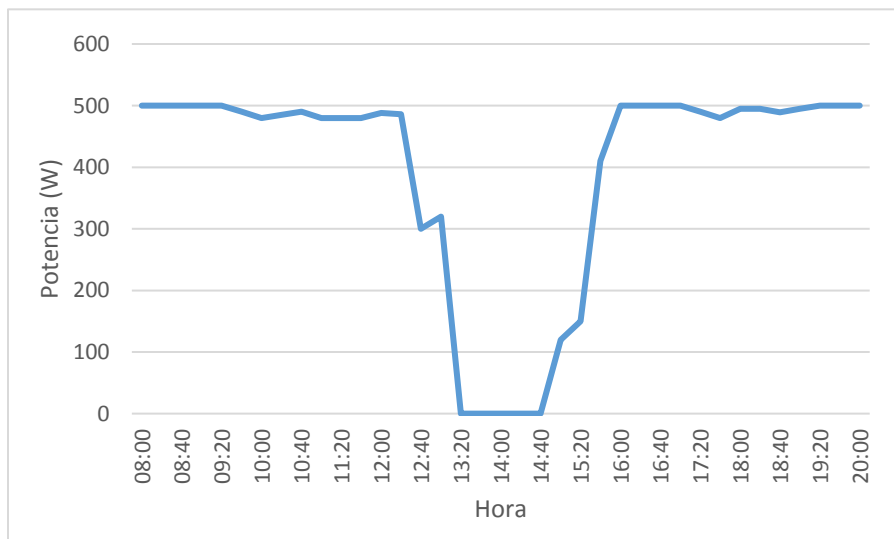
CAPITULO VI. Resultados

6.1 Potencia eléctrica generada

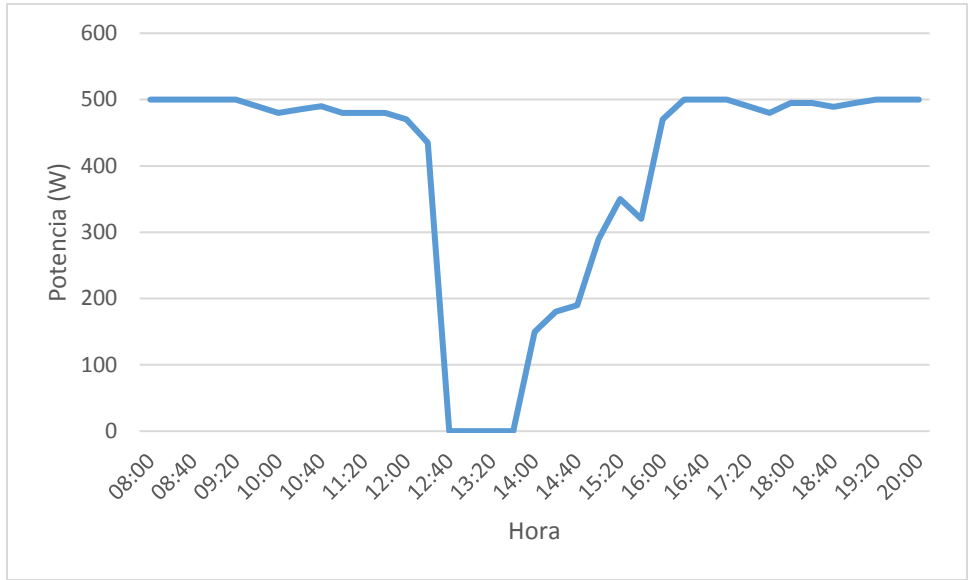
Adjunto a los comportamientos de TSR y Coeficiente de Potencia mostrado en la Gráfica 5 (Página 70), a continuación, en las Gráficas 6, 7 y 8 la potencia generada por hora del día durante los días medios del mes de febrero.



Gráfica 6 Potencia generada en Watts el día 15 de febrero del 2022 Fuente: *García., M. Grupo de tribología y transporte. Facultad de Ingeniería. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. (2022).*

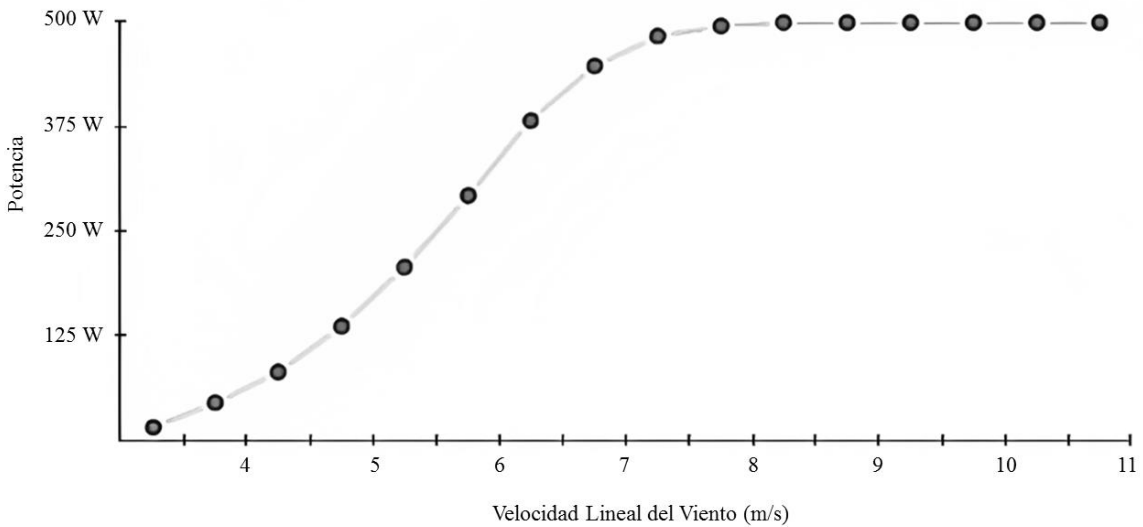


Gráfica 7 Potencia generada en Watts el día 16 de febrero del 2022 Fuente: *García., M. Grupo de tribología y transporte. Facultad de Ingeniería. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. (2022).*



Gráfica 8 Potencia generada en Watts el día 17 de febrero del 2022 *Fuente: García., M. Grupo de tribología y transporte. Facultad de Ingeniería. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. (2022).*

Nótese como en las gráficas 6, 7 y 8 existe una intermitencia persistente alrededor de las 12:00 y las 14:00 hrs, ya que a esas horas la velocidad lineal del viento decae por debajo de los 8 m/s, lo que nos permitió deducir el comportamiento la velocidad de corte necesaria para excitar el alternador de la turbina; la cual puede observarse en la Gráfica 9.



Gráfica 9 Comportamiento de la turbina con respecto a la velocidad del viento *Fuente: García., M. Grupo de tribología y transporte. Facultad de Ingeniería. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. (2022).*

La intermitencia energética por debajo de su régimen es inherente de la naturaleza de la generación eólica, y para este diseño, es importante considerarlo, ya que, por debajo de esta velocidad de corte, el alternador de la turbina funcionara como un motor eléctrico en vez de un generador.

6.2 Parámetros de la turbina

En la tabla 11 se ordenarán todos los parámetros a los que opera la turbina Darrieus Tipo H obtenidas a lo largo de este estudio, todas estas características son congruentes bajo las condiciones climatológicas y psicrométricas mostradas en el estudio eólico correspondiente al mes de febrero del 2022.

Tabla 11 Tabla de especificaciones de la turbina eólica Darrieus Tipo H. Fuente: García., M. Grupo de tribología y transporte. Facultad de Ingeniería. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. (2022).

Correspondientes a la aerodinámica de la turbina	
Especificación	Parámetro
Rango de Potencia	Mini-Eólica
Coefficiente de Potencia (C_p)	0.19032
TSR (λ)	0.3877
Correspondientes al alternador	
Especificación	Parámetro
No. Fases	1 ϕ
Potencia de salida	500 W
Tensiones del TAP	12/24/48 V
Velocidad nominal	900 RPM's
Temperatura máxima de operación	80 °c

6.3 Recomendaciones

- En caso de que la turbina se vaya a posicionar en un tejado, es necesario realizar un análisis estructural del edificio, que asegure que la carga adicional ejercida sobre el techo no comprometerá la estabilidad del inmueble.
- La turbina VAWT Darrieus tipo H es de baja velocidad, ensamblar el rotor directamente con el alternador no será suficiente, es necesario el tren de engranes multiplicador. También se puede utilizar un segundo rin de bicicleta a modo de polea horizontal, es solo cuestión de adaptar la relación de transmisión para obtener la rotación que se desea para el alternador.
- Vientos por encima de los 5 m/s hacen oscilar a la turbina, por lo que se recomienda no prescindir de un grupo de cables tensores acoplados a 2/3 de la altura total del poste y anclados al suelo.
- Si se desea instalar más de una turbina Darrieus tipo H, evitar filas y/o agrupamientos que impliquen más de una hilera, ya que existe una persistente pérdida de energía

cinética respecto a las turbulencias de salida de la turbina, tal y como se mostró en la figura 47.

- Dependiendo de sus características, se puede llegar a instalar un banco de baterías para sobrellevar los intervalos de intermitencia en las que la turbina trabaja como motor eléctrico; sin embargo, para esto es necesaria la implementación de un inversor de corriente y un rectificador, tal y como se mostró en el diagrama de la figura 30.
- A diferencia de las turbinas de eje vertical, este modelo es capaz de operar ante un alto régimen de turbulencias, por lo que se puede instalar en espacios públicos siempre y cuando se sigan las indicaciones de seguridad mencionados en la Normativa SEMARNAT-081.
- La mayoría de las residencias están configuradas con una instalación monofásica, por lo que es congruente utilizar un alternador monofásico para el funcionamiento de este Sistema GD, sin embargo, en caso de que se usara uno trifásico para este tipo de instalaciones, se debe considerar una distribución de cargas, de tal manera que todas las fases estén balanceadas.

6.4 Discusión de Resultados

Se recabaron los resultados obtenidos por VAWT empleadas como muestra en varios estudios de artículos científicos para realizar una comparación de nuestro rotor eólico. En las figuras 55, 56 y 57 se muestran los modelos de turbina, así como en las tablas 12, 13 y 14 se desplegarán los parámetros de operación que se registraron en sus respectivos estudios.

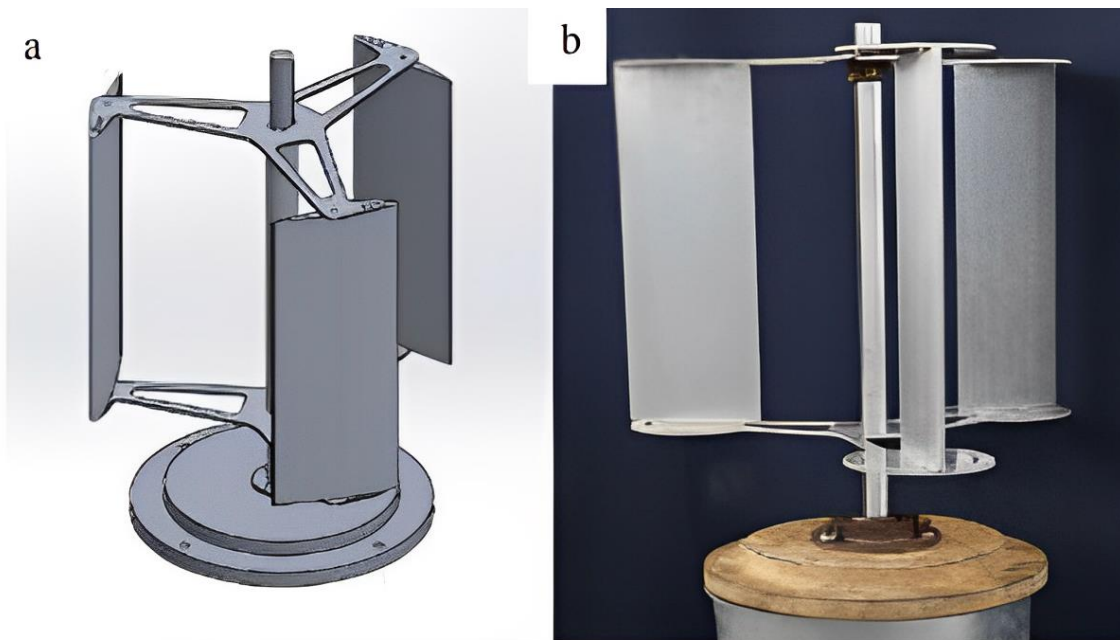


Figura 55 Kalakanda. A., Nallapaneni., M. Fuente: *Vertical axis wind turbine: Aerodynamic modelling and its testing in wind tunnel. Procedia Computer Science 93. 1017-1023. (2016)*

Tabla 12 Comparación de los resultados de la VAWT Darrieus Tipo H y la turbina muestra del artículo Aerodynamic modelling and its testing in wind tunnel. *Procedia Computer Science* Fuente: *García., M. Grupo de tribología y transporte. Facultad de Ingeniería. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. (2022), Kalakanda. A., Nallapaneni., M. Fuente: Vertical axis wind turbine: Aerodynamic modelling and its testing in wind tunnel. Procedia Computer Science 93. 1017-1023. (2016)*

Modelo VAWT	Velocidad lineal del viento (m/s)	Radio exterior (m)	Velocidad angular (rad/s)	TSR
Darrieus (Ing. Kalakandra)	7.38	0.48	17.8	0.43
Darrieus Tipo H	7.38	0.495	14.9	0.42

Note como los datos de la tabla 12 no se desfasan demasiado de los resultados de la turbina que se analizaron aquí, aun incluso con el diseño de pala NACA 0012, tal y como se puede observar en la figura 55. Esto implica que aun con las condiciones de Karunya Nagar, que son muy parecidas a las del estado de Puebla en México, es capaz de operar a una velocidad superior con una diferencia de relación de punta mínima; por lo que se puede deducir que aun con un régimen alto de turbulencias, sea aún más eficiente un modelo de cuchilla NACA convencional. Sin embargo, este estudio no considera las pérdidas de energía cinética por turbulencias, lo que reduce su tasa de relación entre la energía que observe de los flujos del viento y la energía de salida.



Figura 56 Bravo. R., Tullis. S., Ziada. S. Fuente: *Performance Testing of a Small Vertical-Axis Wind Turbine. Mechanical Engineering Departament. McMaster University. (2007)*

Tabla 13 Comparación de los resultados de la VAWT Darrieus Tipo H y la turbina muestra del artículo: Performance Testing of a Small Vertical-Axis Wind *Fuente: García., M. Grupo de tribología y transporte. Facultad de Ingeniería. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. (2022), Bravo. R., Tullis. S., Ziada. S. Fuente: Performance Testing of a Small Vertical-Axis Wind Turbine. Mechanical Engineering Departament. McMaster University. (2007)*

Modelo VAWT	Velocidad lineal del viento (m/s)	Velocidad angular (rad/s)	TSR	Cp
Darrieus (Ing. Bravo. R.)	8	14.66076	1.5	0.3
Darrieus Tipo H	8	16.16161	0.38877	0.19032

El modelo Darrieus de los ingenieros Bravo, Tullis y Ziada está diseñado para operar bajos las condiciones de Hamilton Canadá, que está 94 msnm, que posee muchos cuerpos de agua y una temperatura media muy por debajo de los nominales del Estado de Puebla ¿Qué tienen en común sus condiciones para que sean objeto de comparación? Su alto régimen de turbulencias; el plan urbanístico de la ciudad ha provocado que en los últimos años se formen remolinos de viento debido a los altos edificios que se construyeron. Tal y como se puede observar en la Tabla 13, se percibe un significativo salto de eficiencia respecto al desempeño de nuestra turbina, incluso con las grandes diferencias psicrométricas de ambos ambientes, el diseño NACA 0015, tal y como se observa en la figura 56, ofrece un TSR y Coeficiente de potencia más altos con una velocidad angular ligeramente menor a la VAWT Darrieus tipo H, es significa que, aunque su velocidad de rotación sea menor, aerodinámicamente es capaz de aprovechar mejor la energía cinética de los vientos. Sin embargo, su modelo de turbina tiene un tamaño considerable, antes de seleccionar este diseño, el cual debe ser considerado durante el análisis de estructural de la edificación en la que se desea instalar, además de sus costes de manufactura.

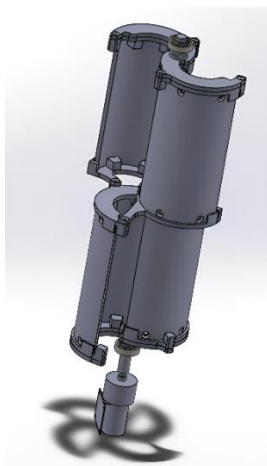


Figura 57 Vidal, D. *Fuente: Diseño de un aerogenerador Savonius para uso doméstico. Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño, Universidad Politécnica de Valencia. España. (2019).*

Tabla 14 Comparación de los resultados de la VAWT Darrieus Tipo H y la turbina muestra del artículo Diseño de un aerogenerador Savonius para uso doméstico Fuente: García., M. Grupo de tribología y transporte. Facultad de Ingeniería. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Fuente: Vidal, D. Fuente: Diseño de un aerogenerador Savonius para uso doméstico. Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño, Universidad Politécnica de Valencia. España. (2019).

Modelo VAWT	Velocidad lineal del viento (m/s)	Velocidad angular (rad/s)
Darrieus (Ing. Vidal)	5	16.36363
Darrieus Tipo H	5	10.10101

El modelo de VAWT de la figura 57 corresponde a un diseño Savonius de doble piso para el estado de Valencia, España; el hecho de que la turbina se de dos pisos le permite dotarse de una excitación del viento más consistente y reducir el coeficiente de arrastre; una decisión de diseño interesante; ya que los diseños Savonius son las VAWT con menos TSR y C_p en existencia. Más allá de llevar a cabo una comparación, parece ser una buena decisión para el desempeño de futuro diseños el dotar a las turbinas de eje vertical con un segundo piso rotado 45° con respecto al piso inferior.

Como se han podido dar cuenta, esta clase de turbinas eólicas, pertenecen casi por inherencia al rango de la Mini-eólica, lo que ha conllevado a un pensamiento generalizado entre la comunidad de ingeniería mecánica y eléctrica. Llama la atención como varios ingenieros e investigadores han preferido prescindir del estudio y aplicación de las VAWT debido a sus altos coeficientes de arrastre y bajas eficiencias, y aun cuando estoy de acuerdo de que la naturaleza de este tipo de rotores eólicos limita de forma tangible sus aplicaciones ante cargas de gran demanda, es incorrecto pensar que estos diseños de turbina son desechables solo por considerar sus bajas velocidades.

Desde siempre, se ha seleccionado el medio de alimentación de una carga con respecto a la demanda de esta misma. Entonces ¿Por qué desde 1994, se siguen utilizando kilómetros y kilómetros de área cuadrada para instalar un parque eólico que apenas si representa una ínfima parte de la demanda de la línea? La única consecuencia que ha tenido esta falta de perspectiva es tener que clasificar esta clase de “zonas verdes” como medios de generación secundaria. Esta falta de perspectiva ha sido tan contundente, que ha escalado al ámbito de la investigación, muchas de las conclusiones en artículos científicos acerca de turbinas eólicas termina llegando a la misma idea; “los rotores de eje horizontal tienen mejor régimen de eficiencia que las de eje vertical y, aun así, tendrían que tener un área de contacto del tamaño de un estado para estar al nivel de generación de una planta de ciclo combinado”. No estoy en contra de los sistemas de generación eólica, en lo absoluto, con lo que si discrepo es con un mal planteamiento a la hora de gestionar una obra “sustentable”, que las tecnologías de energía verde aun estén en pañales no es un pretexto para tomar decisiones precipitadas en afán de ponerse una camisa verde. Tenemos un compromiso con nuestra comunidad y con el mundo, y el Plan de Paris, que nos involucra a todos, es la oportunidad perfecta para que finalmente se conciba la generación de energía sustentable como un medio de

responsabilidad con nuestro entorno sin sacrificar las herramientas de la época Post-moderna, en vez de una serie de acciones que nos lleven a sacrificar más áreas verdes para reemplazarlas por otras que no lo son; y pienso fervientemente que, la noción de nuestro propio espacio a través de la Generación Distribuida, es el primer paso.

Así como ha habido investigadores que han preferido omitir a las VAWT, también ha habido una serie de ingenieros con innovadoras ideas para el sector de generación de energía sustentable a través de la captación de la energía cinética del viento. La empresa ALTAEROS con un interesante diseño de turbina flotante que, a través de una serie de cables tensores y un conductor de gran longitud, interceptan vientos a altitudes superiores a los 600 metros sobre el nivel del suelo. En España, se está desarrollando una turbina eólica que oscila en vez de girar y que, a través de sus vibraciones generadas por las turbulencias del viento, genera energía eléctrica. Incluso no todos los proyectos de parques eólicos son mal gestionados, las hileras submarinas de las costas de Inglaterra y Estados Unidos son una de las maneras más eficientes e ingeniosas que existen para aprovechar el diferencial de temperatura de los vientos de las playas, al igual que lo son las filas de turbinas de eje horizontal a lo largo de las cimas montañosas del Valle de México. Todos estos proyectos son muestra de que “aumentar el tamaño de la pala u ocupar más espacios” no es la única alternativa que existe para utilizar como medio de sustento energético los flujos de viento.

Conclusiones

Retomando las principales problemáticas a combatir en este proyecto ¿la propuesta del sistema de GD con la VAWT Darrieus tipo H es suficiente para satisfacer toda la demanda de una casa-habitación? ¿se minimizo la brecha que existe entre la sostenibilidad y sustentabilidad que requiere una residencia? Considerando que la carga máxima que puede tener una residencia promedio de México es alrededor de 12,000 W, los 500 W que es capaz de generar la turbina apenas si representa la vigésima cuarta parte de esa demanda; sin embargo, siendo pragmáticos, es improbable que se demande toda la carga de una residencia, según el estudio de SEMARNAT del 2021; en Puebla se llega a consumir 1,033.68 KW/h en horas pico distribuidas entre todas las cargas, por lo que el sistema de Generación Distribuida aquí planteado amortiguaría este consumo con una tasa de 0.5 KW de forma constante (salvo en los tiempo de intermitencia). A largo plazo es sistema de GD se proyecta que será capaz de reducir los costos de consumo de energía eléctrica entre un 20 y 40%, considerando los tiempos en las que el alternador funciona como motor eléctrico. Sin embargo, sería negligente solo depender de la VAWT Darrieus tipo H, ya que claramente no representa toda la demanda de una casa-habitación, sin contar las intermitencias energéticas, pero opino que este percance puede contrarrestarse al instalar diferentes tipos de medios de generación sustentable que trabajen en conjunto con el sistema GD, ya sea en forma de placas fotovoltaicas o la hibridación de otro sistema eólico, eso ya sería a criterio del consumidor; solo no olvide todas las medidas de seguridad antes mencionadas.

Respecte a la sostenibilidad energética de la residencia con respecto a la sustentabilidad del sistema aquí planteado, aún falta bastante investigación y desarrollo de ingeniería como para que argumente que esta clase de instalaciones de generación verde sean suficientes como para abastecerse únicamente a través de este modelo descentralizado. No obstante, el espacio necesario para este sistema de Generación Distribuida es más congruente con la idea de sustentabilidad que plantean estos medios de obtención de energía. Destacaría la selección de materiales de esta turbina, sus diseños de manufactura y ensamble, así como sus análisis de operación en CFD; ya que uno de las mayores adversidades al hacer uso de esta clase de sistemas de generación es el planteamiento de su futuro reciclaje y las interacciones que tienen los flujos del viento con respecto al resto del entorno. Por lo general, tan pronto termina la vida útil de una turbina eólica, esta se desmantela y termina enterrada 15 m bajo tierra o incinerada, lo cual es contraproducente para un elemento que se supone que coexiste con el medio ambiente; el hecho de que varios de los materiales de la VAWT manufacturada aquí hayan sido reciclados y de bajo coste, contrarresta eficientemente esta problemática de rentabilidad. En lo referente al diseño y la elaboración de la turbina, es muy satisfactorio ofrecer un punto de referencia más claro a la hora de, ya que, una de las dificultades más grandes a la hora de realizar el proyecto es que muchos estudios similares se limitan a únicamente mencionar la nomenclatura de su perfil y los resultados de su rotor eólico.

Y hablando de dificultades, entre los objetivos de este proyecto es ofrecer una referencia entre las alternativas que nos solicita el Plan de Paris, así que, en caso de replicar el sistema, una de los inconvenientes más prominentes de este diseño puede que sea el ensamble del

multiplicador y el alternador, recomiendo atentamente acoplar primero los cables tensores antes de realizar dicho ensamble, reducirá radicalmente el riesgo y la dificultad de la unión de estos elementos, también se puede instalar el alternador sobre el suelo si se cuentan con las transmisiones mecánicas pertinentes. Respete a los análisis teóricos, en caso de querer replicarlos o trasladarlos a las características de sus propios modelos, considerar con cuidado las particularidades geométricas de sus diseños y condiciones de su propio estudio eólico, así como el comportamiento de su rotor, por ejemplo; en la VAWT Darrieus tipo H , en las ecuaciones de C_p , C_m y TSR se considera el área de contacto de una sola pala, ya que es una única cuchilla la que intercepta perpendicularmente los flujos del viento y conforme se excita la turbina, el ciclo se repite, permitiendo la rotación, en cambio, en una de eje horizontal, el viento hace contacto con todas las palas del rotor.

La ingeniería es un trabajo en equipo y muy probablemente la manufactura de los alabes, así como el ensamble general de la turbina estaría entre las dificultades de este proyecto si no fuese por la competencia de mi equipo de trabajo. Este sistema de GD, es una obra eléctrica civil como tal, esto implica que su elaboración se verá compensada con varias personas trabajando en ella. El sistema de Generación Distribuida con una VAWT Darrieus tipo H como centro de generación está diseñado para concebirse por un único ingeniero, pero muchas de sus adversidades y retrasos pueden sobrellevarse a través de un buen equipo capacitado en el área.

Tal y como se mencionó en la sección de Resultados, es un tanto incongruente que desde la adopción de las energías sustentables en México en los años 80's y 90's se han instalado parques de generación sustentable al Sistema Eléctrico de Potencia y al final darse cuenta que estos carecían de la oferta necesaria para satisfacer las demandas de las líneas, lo que repercutió en su rezago como medios de generación secundarios y de emergencia, situación que se ha seguido repitiendo a lo largo de los años, y aunque hay matices en este comentario, es una ideología que se ha ido arrastrando debido a la urgente necesidad de Marketing que requerían las energías sustentables. Ahora estamos aquí, casi 30 años después y se han desarrollado diferentes tecnologías y técnicas para flexibilizar el desempeño de estos medios de obtención de energía, pero aún sigue presente esta idea de degradar este tipo de parques al punto de ocupar más espacio que del que es pertinente. No justifico estas acciones, pero una vez finalizado este proyecto, puedo llegar a imaginar la sensación que debió de haber provocado el utilizar tanto tiempo y recursos para que al final tu centro de generación apenas representa una ínfima parte de toda la capacidad que debes abastecer. Ya no se pueden deshacer las acciones realizadas sobre estas áreas verdes ni su modo de gestión, pero si se pueden aprender de ellas, incluso, el comenzar a plantearnos qué hacer con los materiales de las turbinas una vez se termine su vida útil.

Todo el modelo de Generación Distribuida fue diseñado para uso doméstico, pero no es del todo descartable la opción de utilizarla en la industria como un medio de alimentación aislado de la red, tal y como hacen los biodigestores de la industria alimenticia. Quiero aprovechar esta idea para dar una evaluación sobre el sistema GD aquí planteado, que podría describir como funcional, incluso confiable, ya que debido al alto régimen de turbulencias del valle le permite gozar muchas de las virtudes de las VAWT, sin embargo, los intervalos de

intermitencia quitan mucho del atractivo de este sistema. También me gustaría ofrecer una evaluación de la investigación en sí que, aunque me satisface mucho lo generado en este proyecto, hubiese deseado un análisis CFD más completo y una manera de graficar que no fuese análogo, sin embargo, las limitaciones del software estudiantil fueron muy rígidas y el uso de PMU's no fue posible. A grandes rasgos, todos los datos generados y mostrados en este estudio son pertinentes para esta clase de proyectos, pero hubiese sido beneficioso no estar tan limitado con las herramientas de medición. A pesar de estos obstáculos, los méritos inherentes de este sistema lo vuelven una alusión de alimentación sustentable asequible para residencias con un alto régimen de turbulencias, una referencia de diseño para VAWT sin depender de los perfiles NACA y una propuesta de aportación para el Plan de Paris de parte de comunidad de ingeniería mexicana.

Referencias

- [1] García, M., Cruz, M., Juárez, T., Saavedra, N. (2021). Design and construction of a Darrieus vertical axis turbine and analyzed by reverse engineering. *Journal Industrial Engineering*. ECORFAN. Vol. 5. No. 15. 1-9.
- [2] Morales, D., Cruz, M., Juárez, T., Flores, G. (2021). Adaptation of a container tank to a savonius vertical axis turbine analyzed by reverse engineering. *Journal of Technologies in Industrial Processes*. ECORFAN. Vol. 5. No. 13.
- [3] Saavedra, A., Alejos, R. (2019). Diseño de la geometría de un aerogenerador de eje vertical tipo Savonius. 2-3.
- [4] Vázquez, M. (2007). Diseño de una turbina eólica de eje vertical con rotor mixto.
- [5] Barrera, J., Jurado, F., Razo, J., González, R. Aerogenerador de eje vertical para aplicaciones In-situ. Análisis y modelado de un aerogenerador de eje vertical. *Innovación y sustentabilidad Tecnológica*. Instituto Tecnológico de Misantla.
- [6] Tseng, Y., Kuo, C. (2011). Engineering and construction torsional responses of glassfiber/Epoxy composite blade shaft for a small wind turbine. *Procedia Engineering 14*.
- [7] (2021). Red Automática de Monitoreo Meteorológico 12: DIAU-BUAP. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. <http://urban.diau.buap.mx/estaciones/ramm/ramm.html>
- [8] (2021). Estadística de la Energía Generada Liquidada Agregada (MWh) Intermitente y Firme por Tipo de Tecnología. Sistema Eléctrico Nacional. Días de Operación del Mes de: febrero 2021. Proceso de Liquidación: Original (L0). <https://www.cenace.gob.mx/SIM/VISTA/REPORTES/EnergiaGenLiqAgregada.aspx>
- [9] Canalejo, D. (2011). Generador eólico para uso doméstico. Escuela Universitaria Politécnica de Mataró. 5-7.
- [10] Villanueva, J., Álvarez, R. (2007). Modelado del coeficiente de potencia de un aerogenerador por efecto de fricción. Universidad Nacional Autónoma de México.
- [11] Estrella, B. (2008). Prototipo Experimental Turbina Eólica de Eje Vertical. Tecnológico de Monterrey. 8-19.
- [12] Huacuz, J. (2016). Tendencias en el Desarrollo de la Tecnología Eólica. *Premio Nacional de Tecnología e Innovación*.
- [13] Torres, A. (2015). Simulación y análisis de interacción fluido-estructura en alabe de turbina de motor a reacción mediante método por elemento finito. Instituto Politécnico Nacional.
- [14] Battista, H. (2000). Las turbinas eólicas. Universidad Nacional de la Plata.
- [15] Solidworks. (2021). <https://www.solidworks.com/es>
- [16] ANSYS. (2022). <https://www.ansys.com/>
- [17] Matlab. (2021). <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>
- [18] (2021). Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2021-2035. *Secretaría de Energía*. Recuperado de: <https://www.gob.mx/sener/articulos/programa-para-el-desarrollo-del-sistema-electrico-nacional>
- [19] Guanoluisa, E. (2011). Aplicación del método de elementos finitos en la dinámica de fluidos. 38-50.

- [20] Stelee, J. (1977). Finite Element Analysis and Program for Stokes Fluid Flow. Instituto Rochester de Tecnología. Recuperado en: https://scholarworks.rit.edu/theses/?utm_source=scholarworks.rit.edu%2Ftheses%2F7384&utm_medium=PDF&utm_campaign=PDFCoverPages
- [21] Weht G., Giovachinni, J., Sacco C., D'Errico. Mario. (2011). Métodos de elementos finitos aplicado a flujo compresible con gas en equilibrio. *Mecánica Computacional*, Volumen 30. 547-562.
- [22] Sanchez, C. (1956). Cálculo aerodinámico de compresores y turbinas. Recuperado en: <http://oa.upm.es/6418/>
- [23] Battaglia, L. (2009). Elementos finitos estabilizados para flujos con superficie libre: Seguimiento y captura de interface. Universidad Nacional de Litoral. 24-26.
- [24] Sánchez, C. (2020). Simulación numérica de algunos modelos de turbulencia con aplicaciones a la aerodinámica de fluidos. Universidad Politécnica de Cartagena. 13-34.
- [25] (2021). Análisis matemático, Potencia Eólica, Hidrolate. Recuperado de: <https://hidrolate.wordpress.com/tema/>.
- [26] Lucero, F. (2016). Diseño de un aerogenerador que apoye la demanda energética de un hogar promedio en Bogotá.
- [27] Gutiérrez, P. (2020). Sistemas de energía eólica y solar para la alimentación de luminarias. 44-47.
- [28] (2006). Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-2005, Instalaciones Eléctricas.
- [29] (1994). Norma Oficial Mexicana NOM-081-SEMARNAT-1994: Seguridad en módulos fotovoltaicos y sistemas eólicos.
- [30] (2010). La energía eólica de México. Una perspectiva social sobre el valor de la tierra. *Secretaría de Gobernación*.
- [31] (2015). Paris Agreement. *Organización de las Naciones Unidas*. Recuperado de: <https://unfccc.int/es/process-and-meetings/the-paris-agreement/el-acuerdo-de-paris>
- [32] Gabriela, C., Mario, Durán. (2015). El consumo de energía eléctrica en los hogares de México por nivel de ingresos, 2012. *Tiempo económico*. Volumen 1, Número 31.
- [33] Fabricio, B., Nadjeli, B. (2020). Historias y aprendizajes sobre el desarrollo de la Energía Eólica en México, *Centro de Colaboración Cívica*.
- [34] Diana, I. (2020). Quantifying the potential for climate change mitigation of consumption options *Environ. Res. Lett.* 15 093001.
- [35] Chiara, M. (2016). Se abre el periodo de firma del acuerdo de Paris. *Diversidad biocultural y territorios*. Cambio climático. Recuperado en: http://www.diversidadbioculturalyterritorios.org/pg.base.php?id=12&lang=es%20%20%20&id_post=24
- [36] (2016). México ratifica el acuerdo de Paris sobre el cambio climático. *Centro de Investigación en Política Pública*. Energía y Medio Ambiente. IMCO. Recuperado en: <https://imco.org.mx/mexico-ratifica-el-acuerdo-de-paris-sobre-el-cambio-climatico/>

- [37] (2020). Contribución Determinada a nivel Nacional. *NDC México por el Clima. Gobierno de México. Versión actualizada* Instituto Nacional de Ecología y el Cambio Climático. SEMARNAT.
- [38] (2016). Contribuciones Previstas y Determinadas a Nivel Nacional (INDC) para la adaptación. *Gobierno de México. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático*. Recuperado de: <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/contribuciones-previstas-y-determinadas-a-nivel-nacional-indc-para-adaptacion>
- [39] (2015). Compromisos de Mitigación y Adaptación ante el Cambio Climático para el Periodo 2020-2030, Instrumentación. SEMARNAT. México.
- [40] (2021). Contribuciones previstas y determinadas (INDC). *Mitigación del cambio climático. México ante el cambio climático. Sitio Oficial*.
- [41] (2020). Resumen de las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional presentadas por los países de las Américas y el Caribe en la Conferencia de las Partes COP21 en París ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. *Parlamericas. Gobierno de Canadá*. 13.
- [42] (2021). Mapas eólicos. *Asociación Mexicana de Energía Eólica*.
- [43] (2018). ACUERDO de la Comisión Reguladora de Energía que modifica las disposiciones administrativas de carácter general en materia de acceso abierto y prestación de los servicios de transporte por ducto y almacenamiento de gas natural, en su Apartado 2, Secciones B., Temporadas Abiertas, y D., Mercado Secundario y Cesiones de Capacidad.
- [44] (2018). Mercado Eléctrico Mayorista. *CENACE*. Recuperado en: <https://www.gob.mx/cenace/articulos/sabes-que-es-el-mercado-electrico-mayorista?idiom=es>
- [45] Jiang, Z. (2021). Installation of offshore wind turbines: A technical review. *Department of Engineering Sciences, University of Agder, N-4898, Grimstad, Norway*. Renewable and Sustainable Energy Reviews
- [46] (2013). Turbinas eólicas modernas: Componentes y funciones. Grupo eólico
- [47] (2007). Norma Mexicana NMX-J-ANCE-136-ANCE-2007. Abreviaturas y símbolos para diagramas, planos y equipos eléctricos. *Asociación de Normalización y Certificación, A. C. México*.
- [48] (2016). ¿Cómo funciona un aerogenerador o una turbina eólica? Gecko Solar. México.
- [49] Vidal, D. (2019). Diseño de un aerogenerador Savonius para uso doméstico. *Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño, Universidad Politécnica de Valencia*. España.
- [50] Rodríguez, M. (2015). Máquinas Síncronas I – G862. *Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética, Universidad de Cantabria*. España. Recuperado de: <https://personales.unican.es/rodrigma/primer/publicaciones.htm>
- [51] Zamora, S. (2007). Modelos linealizados de la Máquina Síncrona. Estabilidad Dinámica en Sistemas Eléctricos de Potencia.
- [52] Leiva, F., Pontt, O. (2020). ELO 281 Sistemas Electromecánicos. *Universidad Técnica de Federico Santa María*. Capítulo 4: Devanados. 2-38
- [53] (2013). Electrotecnia aplicada a maquinas síncronas. Máquinas eléctricas. Capítulo 4.

- [54] (2020). Como saber cuál es el consumo trifásico o monofásico de la electricidad. Unisalia. Recuperado: <https://unisalia.com/consumo-trifasico-o-monofasico/>
- [55] Naranjo, B. (2021). Birth LH. Máquinas rotativas de corriente alterna. Recuperado de: https://ikastaroak.birt.eus/edu/argitalpen/backupa/20200331/1920k/es/IEA/E/E09/es_IEA_E09_Contenidos/website_142_motor_de_rotor_bobinado_y_anillos_rozantes.html
- [56] Pernía, M. (2011). Conceptos básicos de máquinas síncronas. Núcleo de Electricidad Unidad. Curricular Tecnología Eléctrica. Departamento de Ingeniería Electrónica. Universidad Nacional Experimental de Táchira, Venezuela. *Recopilación San Cristóbal*.
- [57] Visio. (2016). www.microsoft.com/es-mx/microsoft-365/visio
- [58] (2008). Schneider electric. Capítulo C, Conexión a la red de distribución pública de BT.
- [59] Ávila., C. (2010). Integración de energía eólica a gran escala en los sistemas interconectados. *IEE 3372 Mercados Eléctricos*. Departamento de Ingeniería. Escuela de Ingeniería. Pontificia Universidad Católica de Chile
- [60] (2021). Archi-Expo. <https://www.archiexpo.es/fabricante-arquitectura-design/aerogenerador-eje-horizontal-3856.html>
- [61] (2014). Soriano., L. Modelación de Aerogenerador con compensación difusa. *Departamento de Control Automático*. ISSN: 1024-123X, (JCR), Vol. 2014, 1-8
- [62] (2021). Gunt Hamburg. Máquinas motrices. Turbinas de aire.
- [63] Mendoza, N., Rodríguez, M. (2017). Diseño de un rotor eólico tipo Darrieus helicoidal. *Journal Mechanic Engineering*. ECORFAN. Vol. 1. No. 2. 34-41.
- [64] Martínez, R., García, J., Urquiza, B., Basurto, M., Castro, L., Dávalos, O. (2017). Efecto geométrico de los perfiles aerodinámicos en una micro turbina eólica Darrieus tipo H. Archivos del vigésimo tercer del Congreso Internacional Anual de la SOMIM. Cuernavaca, Morelos, México.
- [65] Camocardi, M. (2012). Control de flujo sobre la estela cercana de perfiles aerodinámicos mediante la implementación de mini-flaps Gurney. Universidad Nacional de la Plata.
- [66] (2016). Funcionamiento de la turbina. Recuperado de: <https://grupo15fluidos.wordpress.com/2016/04/24/funcionamiento-de-la-turbina/>
- [67] (2022). Sistema de Información Energética. Secretaria de Energía. Dirección General de Planeación e Información Energética. Generación bruta de energía (Gigawatts-Hora). México. Consultado en: https://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=cuadro&cvecua=DIIE_C05_ESP
- [68] (2022). Sistema de Información Energética. Secretaria de Energía. Dirección General de Planeación e Información Energética. Generación bruta de energía (Gigawatts-Hora) por tecnología. México. Consultado en: <https://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=cuadro&cvecua=IIIA1C05>
- [69] (2015). Bases del Mercado Eléctrico Mayorista. Cuarta Sección. Secretaria de Energía.

- [70] (2019). Equipo para Generación Distribuida. TEDLE. Consultado en: <https://www.tedle.net/index.php/introduccion-2/>
- [71] Meera, G., Divya, N. (2015). Rotor Side Converter Control of DFIG based Wind Energy Conversion System. *International Journal of Engineering Research and Technology*. Vol. 4. Issue. 08.
- [72] (2020). Gestión de sistemas de Biomasa y Biogás. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Vicepresidencia Tercera del Gobierno. Gobierno de España. Madrid. España. Consultado: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/domesticos/gestion/>
- [73] Peláez, O., Toapanta, D. (2015). Ubicación óptima de unidades de medición fasorial en sistemas de transmisión. Universidad Politécnica Salesiana. Sede de Quito.
- [74] León, L., Reyes, E., Gutiérrez, J., Méndez, A., Chávez, G. (2019). Smart Grids en México: Situación actual, retos y propuesta de implementación. *Revista de Ingeniería Investigación y Tecnología*. No. 2. Recuperado de: <https://www.revistaingenieria.unam.mx/numeros/v20n2-03.php>
- [75] Mendoza, R., Rose, J., Jiménez, F., Escobar, V., Pineda, M. (2012). Las aves del municipio de Puebla. Primera edición. ISBN: 978-607-487-471-6. H. Ayuntamiento de Puebla. Benemerita Universidad Autónoma de Puebla.
- [76] Del Río, S., (2017). Diseño de un aerogenerador tipo H-Darrieus y un estudio de la influencia del ángulo de Pitch, mediante Mecánica de Fluidos Computacional. Escuela de Ingenierías Industriales. Universidad de Valladolid.
- [77] Kalakanda, A., Nallapaneni, M. (2016). Vertical axis wind turbine: Aerodynamic modelling and its testing in wind tunnel. *Procedia Computer Science* 93. 1017-1023. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/306067795>
- [78] Brusca, S., Lanzafame, R. & Messina, M. (2014). Design of a vertical-axis wind turbine: how the aspect ratio affects the turbine's performance. *Int J Energy Environ Eng* 5, 333–340. Consultado en: <https://doi.org/10.1007/s40095-014-0129-x>
- [79] Bravo, R., Tullis, S., Ziada, S. (2007). Performance Testing of a Small Vertical-Axis Wind Turbine. Mechanical Engineering Department. McMaster University. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/265987114>
- [80] Danao, L. (2013). A Numerical Investigation Into The Performance And Aerodynamics Of a Vertical Axis Wind Turbine. *PHILIPPINE ENGINEERING JOURNAL*. PEJ 2013; Vol. 34, No. 2: 1-22.
- [81] Sumantraa, B., Chandramouli, S., Premsai, T., Prithviraj, P., Vivek, M., Ratna, V. (2014). Numerical Analysis of Effect of Pitch Angle on a Small Scale Vertical Axis Wind Turbine. *INTERNATIONAL JOURNAL OF RENEWABLE ENERGY RESEARCH*. Vol.4, No.4.
- [82] Tjiu, W., Tjunup, M., Sohif, Mat., Mohd, H., Kamaruzzaman, S. (2015). Darrieus vertical axis wind turbine for power generation I: Assessment of Darrieus VAWT configurations. *Renewable Energy*.
- [83] Balduzzi, F., Bianchini, A., Maleci, R., Ferrara, G., Ferrari, L. (2016). Critical issues in the CFD simulation of Darrieus wind turbines. *Rewable Energy*. Vol. 85. 419-135.

- [84] Torabo., M. (2016). Improved Performance of H-Darrieus Vertical Axis Wind Turbine with Emphasis on Start-up Behavior. Thesis Submitted to the School of Graduate Studies. Universiti Putra Malaysia. Consultado en: <https://www.researchgate.net/publication/290061854>
- [85] Gang., D. Chun-Kau., W. (2015). Unsteady Flow Numerical Simulation of Vertical Axis Wind Turbine. *Procedia Engineering*. 734-740.
- [86] Parra., T. Gallegos., A. Uzarraga., C. Rodríguez., M. (2016). Numerical study on small scale vertical axis wind turbine. *Web of Conferences*. Volume 114.
- [87] Fernández., A. Fernández., J. Argüelles., K. Velarde., S. (2016). Turbulence-Model Comparison for Aerodynamic-Performance Prediction of a Typical Vertical-Axis Wind-Turbine Airfoil. *Energies*. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/330896171_Turbulence-Model_Comparison_for_Aerodynamic-Performance_Prediction_of_a_Typical_Vertical-Axis_Wind-Turbine_Airfoil
- [88] López., O. (2021). Estudio aerodinámico de un perfil de NACA. Trabajo de fin de grado. Grado en ingeniería mecánica. Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona.
- [89] Mártil., I. (2018). Las bases científicas de la energía eólica. *Público*. Universidad Complutense de Madrid. Obtenido de: <https://blogs.publico.es/ignacio-martil/2018/07/06/las-bases-cientificas-de-la-energia-eolica/>
- [90] Franco., I, Melgarejo., B. (2020). Desarrollo de una turbina eólica vertical de baja velocidad. Proyecto de grado. Facultad de Ingeniería Mecánica. Universidad Pontificia Bolivariana. Floridablanca, Colombia.
- [91] (2022). Catálogo de alternadores y marchas. ACDELCO. Autopartes.
- [92] (2022). Catálogo de alternadores de CA. Proveedores Marsrock. Consultado en <https://spanish.alibaba.com/g/alternator-for-wind-turbine.html>
- [93] (2021). Consumo de energía por hogar, México 2021. SEMARNAT. Recuperado de: http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D2_ENERGIA_06_20&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce&NOMBREENTIDAD=* & NOMBREANIO=*