

CARACTERIZACIÓN DEL RUIDO AERODINÁMICO EN GENERADORES EÓLICOS DE EJE HORIZONTAL MEDIANTE ANÁLISIS COMPUTACIONALES

LUIS FERNANDO GONZALEZ PEREZ

**PROGRAMA DE INGENIERIA MECANICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA,
MECATRONICA E INDUSTRIAL
FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURAS**



UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
PAMPLONA, diciembre 1 de 2022

CARACTERIZACIÓN DEL RUIDO AERODINÁMICO EN GENERADORES EÓLICOS DE EJE HORIZONTAL MEDIANTE ANÁLISIS COMPUTACIONALES

LUIS FERNANDO GONZALEZ PEREZ

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
INGENIERO MECÁNICO**

Director: JUAN CARLOS SERRANO RICO
jcserrano@unipamplona.edu.co

**PROGRAMA DE INGENIERIA MECANICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA,
MECATRONICA E INDUSTRIAL
FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURAS
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
Pamplona, diciembre 1 de 2022**

Dedicatoria

A mis padres, esposa e hija quienes me han amado, acompañado, respetado, motivado y me han brindado su apoyo incondicionalmente en este proceso formativo tanto personal como académicamente.

AGRADECIMIENTOS

Mis más sinceros agradecimientos a todos los docentes del programa de ingeniería mecánica que con su experiencia y vocación me brindaron los conocimientos y las bases esenciales para el desarrollo de este proceso educativo. En especial a mi director de tesis Juan Carlos Serrano por el tiempo, la motivación y el apoyo para la realización de este trabajo. Igualmente, agradecido con mis padres, esposa e hija los cuales brindaron ese apoyo emocional que necesite en muchas ocasiones. por último, pero no menos importante agradezco a mis compañeros de estudio por brindarme esa amistad y ese apoyo en los momentos que lo necesite.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCION Y JUSTIFICACION	12
1.1 INTRODUCCION	12
1.2 JUSTIFICACION.....	12
1.3 OBJETIVOS.....	13
1.3.1 Objetivo general.....	13
1.3.2 Objetivos específicos	13
2. ESTADO ACTUAL	14
2.1 Historia	14
2.2 Tratado de Kioto.	16
2.3 tratado de paris.....	17
2.4 energia eolica mundial.....	17
2.4.1 Energía eólica en Colombia.	19
2.4.1.1 Parque eólico Jepírachi.	20
2.5 salud y niveles de ruido	21
2.6 Ruido en aerogeneradores	22
2.6.1 Ruido mecánico.....	22
2.6.2 Ruido aerodinámico	23
2.7 estudio de ruido en aerogeneradores	24
2.8 Propagación de onda sonora.....	25
2.9 Tipo de fuentes sonoras	26
2.10 niveles de ruido	27
3. METODOLOGIA.....	30
3.1 selección de metodología	30
3.1.1 Modelos de propagación	30
3.1.1.1 Analogía acústica de Lighthill.	31
3.1.1.2 Analogía Ffowcs-Williams & Hawkins.....	32
3.2 fuentes de ruido aerodinámico en aerogeneradores	35
3.2.1 Emisión de ruido debido al desprendimiento de los vórtices de la capa 35	
3.2.2 Emisión de ruido debido al desprendimiento de la capa límite turbulenta en el borde de salida:.....	36

3.2.3	Emisión de ruido debido a la formación del vórtice en la punta del aspa:	37
3.2.4	Emisión de ruido debido al flujo turbulento incidente:	37
3.3	diseño del aerogenerador	39
3.4	Simulación CFD	41
3.4.1	Dominio de análisis	41
3.4.2	Generación la malla	42
3.4.2.1	Calidad de la malla	42
3.4.2.2	Mallado.	44
3.4.3	Modelos de turbulencia	46
3.5	Simulación FW & H.....	49
3.5.1	Posición de mediciones acústicas.....	50
3.5.1.1	Norma IEC 61400-11.....	50
3.5.1.2	Posición de micrófonos.....	50
3.5.2	Cálculos con decibelios (dB)	53
3.5.2.1	Adición de niveles de presión acústica (suma logarítmica)	53
3.5.2.2	Corrección por ruido de fondo (resta logarítmica).....	53
4.	RESULTADOS	54
4.1	Geometría de referencia.....	54
4.2	Resultados rediseño 1.	58
4.3	Resultados rediseño 2.	59
5.	ANÁLISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS.....	62
6.	CONCLUSIONES.....	64
7.	RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	65
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66
9.	ANEXOS	68
9.1	Mallas generadas	68
9.2	resultados simulación fw&h	70
9.3	Obtención del torque.....	72

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Potencia eólica instalada en los países de la unión europea (MW)</i>	18
<i>Tabla 2 Parámetros para la construcción del volumen de control</i>	42
<i>Tabla 3 Valores para determinar calidad de malla.</i>	43
<i>Tabla 4: Número de elementos y nodos en los dominios</i>	45
<i>Tabla 5: Oblicuidad de la malla</i>	45
<i>Tabla 6: Ortogonalidad de la malla</i>	45
<i>Tabla 7 Modelos de turbulencia RANS más comunes</i>	47
<i>Tabla 8: valores de paso del tiempo</i>	49
<i>Tabla 9: Valores de referencia posición micrófono</i>	52
<i>Tabla 10: Valores torque y ruido geometría de referencia</i>	56
<i>Tabla 11: Comparación diseños del alabe</i>	57
<i>Tabla 12: Calidad de malla para rediseños</i>	58
<i>Tabla 13: Valores torque y ruido rediseño 1</i>	59
<i>Tabla 14: Valores torque y ruido rediseño 2</i>	61
<i>Tabla 15: comparación energía cinética turbulenta</i>	62
<i>Tabla 16: Comparación resultados torque y ruido.</i>	63
<i>Tabla 17: Disminución de ruido y torque</i>	63

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1. molino persa.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 2. primer aerogenerador.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 3. primer generador eólico de corriente alterna</i>	<i>16</i>
<i>Figura 4: Aerogeneradores del Parque Eólico Jepírachi</i>	<i>21</i>
<i>Figura 5: salud y niveles de ruido</i>	<i>22</i>
<i>Figura 6. Diagrama de interacción del flujo de aire con la pala.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 7: Escalador quitando las protuberancias” trips” de la hoja dentada.</i>	<i>25</i>
<i>Figura 8: Patrones de directividad para niveles de presión sonora.</i>	<i>26</i>
<i>Figura 9: Espectro de sonido en banda ancha o banda estrecha.</i>	<i>28</i>
<i>Figura 10: Metodología planteada.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 11: Desprendimiento de los vórtices de la capa límite laminar en el borde</i>	<i>36</i>
<i>Figura 12: Formación del vórtice en la punta del aspa</i>	<i>37</i>
<i>Figura 13: Separación de la capa límite (stall).....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 14: Contribuciones relativas de las diferentes fuentes de ruido al espectro</i>	<i>39</i>
<i>Figura 15 Geometría del alabe.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 16 Geometría del aerogenerador.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 17 Vista frontal dimensiones del volumen de control</i>	<i>41</i>
<i>Figura 18 Vista lateral dimensiones del volumen de control</i>	<i>42</i>
<i>Figura 19 Análisis de convergencia del mallado</i>	<i>43</i>
<i>Figura 20: Malla del volumen de control</i>	<i>44</i>
<i>Figura 21: Malla del marco de referencia del aerogenerador.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 22: Zoom para la malla del aerogenerador</i>	<i>45</i>
<i>Figura 25 Modelos de turbulencia.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 26: Modelo y parámetros de simulación</i>	<i>48</i>
<i>Figura 27: habilitación analogía acústica</i>	<i>49</i>
<i>Figura 28: Patrón estándar de medición para las posiciones.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 29: Aerogenerador de eje horizontal.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 30: Posición micrófonos</i>	<i>52</i>
<i>Figura 31: Streamline de velocidad.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 32: Energía cinética turbulenta geometría de referencia.</i>	<i>55</i>
<i>Figura 33: Espectro de presión sonora en la geometría de referencia.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 34: Energía cinética turbulenta rediseño 1</i>	<i>58</i>
<i>Figura 35: Espectro de presión sonora en el rediseño 1.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 36: Energía cinética turbulenta rediseño 2</i>	<i>60</i>
<i>Figura 37: Espectro de presión sonora en el rediseño 2.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 38: Malla completa rediseño 1</i>	<i>68</i>
<i>Figura 39: Zoom malla rediseño 1</i>	<i>68</i>

<i>Figura 40:Malla completa rediseño 2</i>	<i>69</i>
<i>Figura 41: Zoom malla rediseño 2</i>	<i>69</i>
<i>Figura 42: Espectro de presión sonora geometria refrencia</i>	<i>70</i>
<i>Figura 43:Espectro de presión sonora rediseño 1</i>	<i>71</i>
<i>Figura 44:Espectro de presión sonora rediseño 2</i>	<i>71</i>
<i>Figura 45:Torque geometría de referencia</i>	<i>72</i>
<i>Figura 46:Torque rediseño 1</i>	<i>73</i>
<i>Figura 47:Torque rediseño 2</i>	<i>73</i>

RESUMEN

La reducción de ruido en generadores eólicos es de vital importancia por su amplia aplicabilidad, el aumento en su uso debido al cambio climático, los altos costos de los combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica y las posibles afectaciones auditivas en los seres humanos causadas por la exposición continua al ruido. Es por eso que este trabajo consta de una metodología basada en bibliografía existente para la disminución del ruido aerodinámico mediante herramientas computacionales CFD y FW&H.

Para la disminución del ruido primero se tomó un aerogenerador de referencia acoplando perfiles aerodinámicos WORTMANN FX 60-126, SG043 y SG042. Simulando y calculando el ruido producido para posteriormente realizar dos propuestas de diseños para la reducción del ruido aerodinámico. Seguido se realizó el procedimiento para la obtención de los niveles sonoros con los mismos valores del aerogenerador de referencia en el cual se obtuvo una disminución significativa del ruido. Pero sacrificando torque en una de las propuestas de diseño.

Los niveles de ruido fueron obtenidos mediante simulaciones CFD y FW&H con un modelo de viscosidad $k-\epsilon$ estándar. La disminución del ruido aerodinámico producido por las propuestas de diseños fue realizada mediante una metodología poco vista la cual consiste brevemente en agregar espinas parecidas a los dientes de un tiburón. En el borde de salida del alabe disminuyendo el desprendimiento de la capa límite.

Palabras clave: Ruido aerodinámico, aerogenerador, capa límite, viscosidad, analogía de Ffocws William & Hawking.

ABSTRACT

Noise reduction in wind generators is of vital importance due to its wide applicability, the increase in its use due to climate change, the high costs of fossil fuels for the generation of electricity and the possible hearing effects in humans caused by noise. continuous exposure to noise. That is why this work consists of a methodology based on existing bibliography for aerodynamic noise reduction using CFD and FW&H computational tools.

To reduce noise, first a reference wind turbine was taken, coupling WORTMANN FX 60-126, SG043 and SG042 aerodynamic profiles. Simulating and calculating the noise produced to later make two design proposals for the reduction of aerodynamic noise. Followed by the procedure to obtain the sound levels with the same values of the reference wind turbine in which a significant noise reduction was obtained. But sacrificing torque in one of the design proposals.

Noise levels were obtained by CFD and FW&H simulations with a standard k- ϵ viscosity model. The reduction of the aerodynamic noise produced by the design proposals was carried out by means of a little-seen methodology which briefly consists of adding spines similar to the teeth of a shark. At the trailing edge of the blade, decreasing the detachment of the boundary layer.

Keywords: Aerodynamic noise, wind turbine, boundary layer, viscosity, Ffocws William & Hawking analogy

1. INTRODUCCION Y JUSTIFICACION

1.1 INTRODUCCION

Dada la creciente preocupación mundial por la degradación medioambiental, por el agotamiento de las reservas y los altos costos de los combustibles fósiles para la generación de electricidad, surge la necesidad de encontrar soluciones energéticas más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente. Dentro de las distintas posibilidades energéticas se encuentra la energía eólica, la cual ha resurgido como una de las alternativas más atractivas en la utilización de fuentes de energía renovables. Una turbina eólica obtiene su potencia de entrada convirtiendo la fuerza del viento en un par que actúa sobre el eje del rotor. (Mueller & Abu-Mulaweh, 2006).

Dado a su alta demanda es necesario optimizar los aerogeneradores tanto en su eficiencia energética como en las emisiones sonoras. Desde el punto de vista acústico los aerogeneradores producen ruido el cual aumenta debido al aumento de la potencia eléctrica, por consiguiente, este proyecto estará enfocado en la caracterización de dichas emisiones sonoras. las cuales suelen tener dos orígenes diferentes: el ruido mecánico el cual se genera principalmente por la caja de cambios y el ruido aerodinámico el cual es típicamente la parte dominante de ruido del generador eólico en la actualidad, este tipo de ruido se origina principalmente en el borde de fuga de los álabes cuando se produce la transición de flujo laminar a flujo turbulento en el rango de frecuencia de 250-10 KHz (Grilo Bensusan, 2016). Existe una fuerte relación entre la velocidad del viento y el ruido que producen los alabes. A medida que aumenta la velocidad aumenta el ruido. A su vez, está directamente vinculado a la producción de energía, por lo tanto, es inevitable su existencia, a pesar de que se podría reducir en cierta medida modificando el diseño de los alabes (Henin, Iannace, Maffei, et al., 2010).

Este proyecto se realizará mediante el análisis de simulaciones computacionales en el software ANSYS en el módulo CFD. Para caracterizar los diferentes tipos de alabes de aerogeneradores y así obtener un modelo con menor contaminación auditiva.

1.2 JUSTIFICACION

En una turbina eólica, el ruido de origen aerodinámico resulta predominante frente al producido por otros mecanismos. Esto conlleva a que la generación ruido no se pueda asignar a un punto particular del aerogenerador, sino que toda la estructura (torre, góndola, pero principalmente la pala) se comporta como una fuente emisora. (Olazábal Barrios, Gianoli Kovar, Cataldo Ottieri, & González Fernández, n.d.) por lo que es necesario caracterizar las emisiones sonoras generadas por las turbinas eólicas puesto que la contaminación acústica en los últimos años ha sido considerada un gran problema para la alteración del ambiente, estimándose actualmente como uno de los principales contaminantes a causa de la acelerada expansión demográfica en todo el mundo (Samaniego & Efén, 2019).

Este desarrollo beneficiara a todas las comunidades aledañas y el medio ambiente en general por la disminución de la contaminación acústica dado que el mayor generador de ruido de los aerogeneradores son sus alabes y es el cual se atacará en este estudio modificando su diseño mediante herramientas computacionales y simulaciones de CFD y FW&H por su versatilidad y su disposición en el software ANSYS de la institución.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general

Caracterizar el ruido aerodinámico en aerogeneradores de eje horizontal mediante el análisis de simulaciones computacionales de CFD.

1.3.2 Objetivos específicos

- Seleccionar las diferentes metodologías de análisis de ruido.
- Determinar las fuentes generadoras de ruido aerodinámico en aerogeneradores de eje horizontal mediante herramientas computacionales.
- Desarrollar una metodología de diseño de alabes con disminución de ruido aerodinámico
- Validar computacionalmente la metodología desarrollada.

Este trabajo esta organizado de la siguiente manera: en el capitulo 2 se contextualiza toda la información sobre la historia de los aerogeneradores, la potencia eólica a nivel mundial, las afectaciones del ruido en la salud humana, las consideraciones básicas sobre aerodinámica en aerogeneradores, y consideraciones básicas sobre aeroacústica. En el capitulo 3 se explica lo que se hizo para el diseño del alabe, el rediseño, simulaciones y todo lo que tiene que ver con la metodología utilizada. En el capitulo 4 encontraremos todos los resultados obtenidos en esta investigación. En el capitulo 5 tendremos todo lo relacionado con el análisis de los datos obtenidos en el capitulo anterior y en capitulo 6 las conclusiones del todo el trabajo realizado.

2. ESTADO ACTUAL

2.1 HISTORIA

El viento es una fuente de energía gratuita, limpia e inagotable. Ha sido ocupada desde siglos para impulsar barcos y mover molinos; para bombear agua y moler trigo. Aunque el aprovechamiento de la energía eólica data de las épocas más remotas de la humanidad (los egipcios ya navegaban a vela en el año 4.500 [a.C.]), la primera noticia que se tiene sobre el uso del viento mediante un molino proviene de Heron de Alejandría que construyó una estructura en el siglo 2 [a.C.] para proporcionar aire a su órgano. Los molinos más antiguos, pertenecientes a la civilización persa en el siglo 7 [d.C.], eran de eje vertical y se utilizaban para la molienda y bombeo de agua (Nuñez, 2004). Como se muestra en la Fig 1.

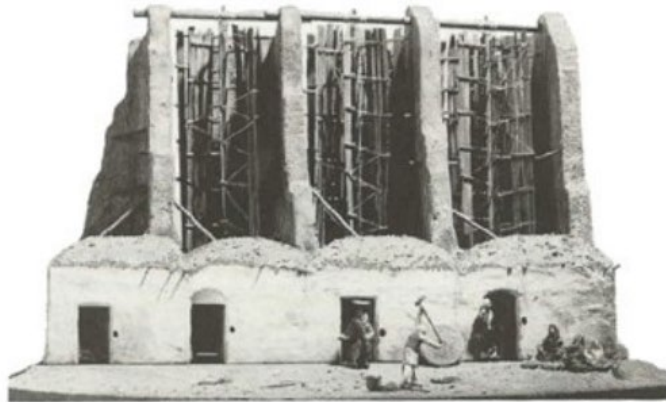


Figura 1. molino persa
Fuente: (Nuñez, 2004)

Los más antiguos molinos que se conocen eran de eje vertical. Hacia el siglo VIII aparecieron en Europa, procedentes del este, grandes molinos de eje horizontal con cuatro aspas. Su fabricación en gran número, en particular por los holandeses, les hizo alcanzar una gran firmeza, pese a que, debido a las dimensiones de sus aspas distaban mucho de recoger el máximo de potencia. Necesitaban una regulación de la orientación de la tela. Los molinos de viento de eje horizontal han de hacer siempre frente al viento. Estos molinos eran muy adecuados para vientos del orden de 5 m/s, es decir, unos 20 km./h (*Centrales Eólicas*, n.d.).

Como precursor de los actuales aerogeneradores es la aeroturbina de Lacourt (1892), máquina de cuatro palas de 25 metros de diámetro capaz de desarrollar entre 5 y 25 kW ver Fig 2 . Durante las primeras décadas del siglo XX, el avance de la tecnología aeronáutica establece las bases de los actuales aerogeneradores, aunque es necesario esperar hasta la crisis del petróleo de 1973 para que la energía

eólica cobre un vivo impulso como fuente energética para la generación de electricidad (Espejo Marín, 2004).

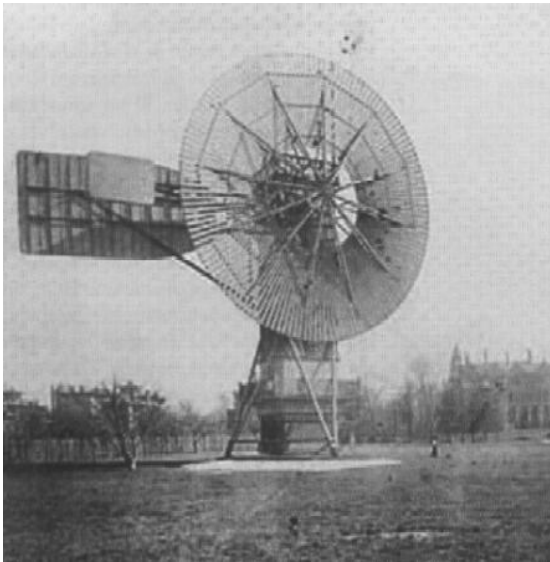


Figura 2. primer aerogenerador

Fuente: <http://lasnaturalesdepaola.blogspot.com/2015/03/lafuente-de-energia-eolica.html>

Fue entre las guerras mundiales cuando los aerogeneradores empezaron a aparecer con mayor frecuencia, como consecuencia de los progresos técnicos de las hélices de aviación y con ellas los proyectos de grandes aerogeneradores de dos o tres palas. La primera tendencia fue construir bipalas, ya que resultaban más económicos. Incluso se pensó en utilizar una única pala equilibrada con un contrapeso (Nuñez, 2004).

En 1956, en Dinamarca, se construyó el primer aerogenerador de corriente alterna: el Gedser Tenía muchas innovaciones tecnológicas, no solo en lo que concierne a la generación de electricidad, sino también en el campo de la aerodinámica y sistema de control (frenos aerodinámicos y regulación por pérdida de velocidad) ver Fig 3 (*Viento Dinamarca*, n.d.)



Figura 3. primer generador eólico de corriente alterna

Fuente:

<http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/6726/621312136A683.pdf?sequence=1>

2.2 TRATADO DE KIOTO.

El Tratado de Kioto es un suceso clave en el desarrollo de la energía eólica por la preocupación del sobre calentamiento global. En la convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMCC) de 1992 se definió la legislación internacional congruente con los mecanismos de desarrollo limpio (MDL) los cuales se basan en reducir emisiones o capturar carbono. En 1997 se realizó la tercera conferencia de las partes de CMCC, la cual tuvo lugar en Kioto, donde se especificó el marco jurídico aplicable y se incluyen las decisiones adoptadas por las diferentes partes que contemplan guías técnicas y de procedimiento. Este fenómeno tiene como responsable a los gases invernadero que crean una capa capaz de retener radiaciones y por ende generar un aumento de la temperatura promedio de la tierra. El sobrecalentamiento es responsable de cambios climáticos que conllevan desastres grandes en todo el mundo. Establecido en 1997, el Protocolo de Kioto es un tratado internacional cuyo objetivo principal es lograr que entre los años 2008 y 2012 los países disminuyan sus emisiones de gases de efecto invernadero a un 5 % menos del nivel de emisiones del año 1990.(Nuñez, 2004)

2.3 TRATADO DE PARIS

El 12 de diciembre de 2015, 195 naciones¹ firmaron en París un acuerdo para combatir el cambio climático en el marco de la conferencia de la Organización de Naciones Unidas (ONU) sobre el clima (COP 21). La cumbre contó con la asistencia de 150 jefes de Estado, lo que muestra que el cambio climático se encuentra en la agenda política internacional. Un total de 188 países presentaron propuestas nacionales de contribuciones climáticas, lo que representa más del 95% de las emisiones. Una vez que el Acuerdo sea depositado en las Naciones Unidas estará a disposición para ser firmado durante un año a partir del 22 de abril de 2016, el Día de la Madre Tierra. El Acuerdo requiere que 55 países que representen al menos el 55% de las emisiones mundiales hayan depositado sus instrumentos de ratificación. Entrará en vigor en 2020 y se revisará al alza cada 5 años.(Fernández-Reyes, 2016)

2.4 ENERGIA EOLICA MUNDIAL.

La energía eólica es una de las varias fuentes de energía alternativas a los recursos de energía primaria convencionales, que ahora impulsan las actividades industriales y socioeconómicas del hombre en todo el mundo. Recientemente, la energía eólica es la fuente de energía en crecimiento en el mundo y la energía eólica es una de las fuentes alternativas de energía más utilizadas. Hoy en día, la energía eólica se usa ampliamente para producir electricidad en muchos países como Dinamarca, España, Alemania, Estados Unidos e India. La energía eólica es limpia y la electricidad generada por las turbinas eólicas no ensucia el aire que respiramos ni emite contaminantes como otras fuentes de energía; eso significa menos smog, menos lluvia ácida y menos emisiones de gases de efecto invernadero. Los estudios sobre las perspectivas a largo plazo para el desarrollo energético mundial muestran que la energía eólica es un recurso energético económicamente eficiente y accesible para una utilización a gran escala en las próximas décadas. y un futuro más remoto. La energía eólica se puede utilizar para una variedad de funciones que van desde molinos de viento hasta bombeo de agua y barcos de vela. Con la creciente importancia de los problemas ambientales, la generación de energía limpia se vuelve esencial en todos los aspectos del consumo de energía. El viento es un recurso inagotable que puede proporcionar cantidades importantes de energía para satisfacer las necesidades de un país. Desde la historia más antigua registrada, el hombre ha estado aprovechando la energía del viento.(Dincer, 2011)

Desde entonces, el esfuerzo realizado por el sector eléctrico en proyectos de investigación y demostración ha dado lugar a un notable desarrollo del aprovechamiento de la energía eólica para la producción de electricidad. La potencia eólica instalada en el conjunto de países que la integran ha pasado de 2.529 MW en 1995 a 20.284 MW en 2002, y se mantiene el ritmo de crecimiento. Como se expone en la *Tabla 1* cada país presenta una tendencia distinta, aunque

unos pocos acumulan la mayor parte de la capacidad instalada en la Unión Europea(Espejo Marín, 2004).

Annual Capacity (2020, MW)		Cumulative Capacity (end of 2020, MW)	
China	52,000	China	288,320
United States	16,836	United States	121,985
Brazil	2,297	Germany	62,850
Netherlands	1,979	India	38,625
Germany	1,668	Spain	27,250
Norway	1,532	United Kingdom	23,937
Spain	1,400	France	17,948
France	1,318	Brazil	17,750
Turkey	1,224	Canada	13,578
India	1,119	Italy	10,543
Rest of World	11,538	Rest of World	119,572
TOTAL	92,910	TOTAL	742,357

Tabla 1. Rankings internacionales de capacidad de energía eólica
Fuente:(Wiser et al., 2021).

A fines de 2015, la capacidad total de energía renovable se superó en 1849 GW, lo que representó un 8,7 % más que en 2014 y las energías renovables comprendieron más del 28,9 % de la capacidad total de generación de energía a nivel mundial, capaz de generar el 23,7 % de la electricidad total a nivel mundial. En 2015, solo la energía solar y eólica agregaron más del 77 % de las capacidades totales de energía renovable, mientras que la energía hidroeléctrica aumentó un 2,7 % a un estimado de 1064 GW, lo que representa aproximadamente el 19 % de las adiciones. En 2015, las energías renovables representaron el 60 % de las adiciones netas a la capacidad energética global y representaron proporciones mucho más altas de capacidad agregada en varios países del mundo. El crecimiento de las acciones de energía renovable también se señaló en diferentes países y regiones, como la Unión Europea, la energía renovable representó que más del 77% se agregó durante 2015. Energías renovables (incluyendo electricidad, calefacción y transporte) seguido por Estados Unidos, Brasil, Alemania y Canadá respectivamente. En las nuevas capacidades instaladas de energía renovable no hidroeléctrica, la Unión Europea compartió el 35,1% de las capacidades totales seguida por los países BRICS con el 33,3%. .(Sahu, 2018)

Según las Estadísticas eólicas globales 2016 publicadas por GWEC, las capacidades acumuladas de energía eólica mundial alcanzaron los 486,74 GW con la nueva instalación de 54,6 GW a fines de 2016. Entre las distribuciones regionales, Asia lideró con las capacidades instaladas totales con 203,6 GW seguida de UE 166,3 GW, América del Norte 97,6 G, América Latina y el Caribe 15,29 GW, región específica 4,9 GW, África y Oriente Medio 3,9 GW. Entre los países, los diez principales nuevos países instalados fueron China, seguido de EE. UU, Alemania,

India, Brasil, Francia, Turquía, Holanda, Reino Unido, Canadá y resto del mundo respectivamente.(Sahu, 2018)

En 2021 se agregó 93,6 GW de nueva energía eólica en todo el mundo, solo un 1,8% menos que el récord de 2020, trayendo la total capacidad eólica instalada a 837 GW, un crecimiento del 12,4% respecto al último año. Aunque las nuevas instalaciones en el mercado eólico terrestre cayeron a 72,5 GW el año pasado, seguía siendo el segundo año más alto de la historia.

El mercado eólico marino tuvo un récord año con más de 21 GW de red conectados, tres veces más que el año anterior, haciendo de 2021 el año más alto de la historia. Gracias al asombroso crecimiento de instalaciones en China (offshore) y Vietnam, Asia Pacífico continúa tomar la delantera en la energía eólica mundial desarrollo con su cuota de mercado en 2021 casi lo mismo que en 2020. Impulsado por un año récord de instalaciones eólicas en tierra, Europa (19%) recuperó el título de la segunda mercado regional más grande para nuevas instalaciones de América del Norte (14%) el año pasado. América Latina y África y Medio Oriente también tuvieron un año récord en nuevas instalaciones en 2021 con su mercado global cuota alcanzando el 6% y el 2% respectivamente, pero las dos regiones permanecer en las mismas posiciones que el año anterior Los cinco principales mercados del mundo en 2021 para nuevas instalaciones fueron China, Estados Unidos, Brasil, Vietnam y el Reino Unido. Estos cinco mercados combinados representaron el 75,1% de instalaciones globales el año pasado, colectivamente un 5,5 % menos que en 2020, principalmente debido a China y EE. UU. Perdiendo un mercado combinado del 10% participación en comparación con 2020.

En términos de instalaciones acumuladas, los cinco principales mercados al final de 2021 se mantuvieron sin cambios. Esos mercados son China, Estados Unidos, Alemania, India y España, que juntos representaron el 72% de la energía eólica total del mundo, un 1% menos que en 2020 72,5 GW de nueva eólica terrestre capacidad se registró a nivel mundial en 2021, trayendo acumulativo en tierra de 780 GW.(*Annual-Wind-Report-2022_screen_final_April*, n.d.)

2.4.1 Energía eólica en Colombia.

Colombia, es el cuarto país en extensión territorial de América del Sur con 1.141.748 Km² y una población de aproximadamente 49 millones de habitantes, que lo hace que sea el tercer país con mayor población en América Latina. Geográficamente, Colombia está ubicada en el noroccidente de América del Sur y cuenta con un territorio marítimo de 928.660 Km², con costas en los dos océanos con una longitud de 2.500 y 2.400 kilómetros en los litorales Caribe y Pacífico, respectivamente. Esto hace que Colombia tenga una condición privilegiada en recursos renovables de energía como la asociada con el viento.

Debido a la demanda de energía en el país, durante los últimos 12 años el desarrollo en la generación de energía eléctrica a partir de la energía eólica ha venido tomando fuerza a raíz de la construcción del Parque Eólico Jepírachi en la Guajira.

2.4.1.1 Parque eólico Jepírachi.

El Parque Eólico Jepírachi⁶⁵ es el primer proyecto de energía eólica en Colombia y el primer proyecto colombiano aprobado por la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático. Este parque pertenece a las Empresas Públicas de Medellín (EPM) y se encuentra ubicado en el departamento de La Guajira entre las localidades del Cabo de la Vela y Puerto Bolívar, exactamente en el municipio de Uribia la cual es una zona que es adecuada para la generación de energía eléctrica a partir de la eólica debido a sus buenos vientos. La zona del parque eólico pertenece al resguardo indígena Wayuu, el cual es el grupo étnico más numeroso del país.

La construcción de este parque eólico fue realizada entre los años 2002 y 2003, y fue inaugurado oficialmente el 21 de diciembre de 2003, sin embargo, entró en operación el 19 de abril del 2004. Jepírachi tuvo una inversión de 28 millones de dólares y las expectativas económicas por estímulos económicos que se esperaban por su impacto ambiental nunca se cumplieron.

Los aerogeneradores están compuestos por un rotor de 60 metros de diámetro y un generador instalado sobre una torre de 60 metros de altura. Estos aerogeneradores están instalados en dos filas de 8 y 7 máquinas respectivamente entre las playas y las comunidades Kasiwolin y Arutkajui, entre fila y fila hay una separación aproximadamente de 1 kilómetro. Por otro lado, entre aerogeneradores la distancia promedio es de 180 metros. Durante los dos primeros años de operación, el parque alimentó la red eléctrica nacional con aproximadamente 120 GWh.(José & Gutiérrez, 2016.)



*Figura 4: Aerogeneradores del Parque Eólico Jepírachi
Fuente: Econoticias.*

2.5 SALUD Y NIVELES DE RUIDO

El sonido es cualquier fenómeno que involucre la propagación de ondas mecánicas (sean audibles o no), generalmente a través de un fluido (u otro medio elástico) que esté generando el movimiento vibratorio de un cuerpo. Por otro lado, el ruido se define como sonido molesto o perturbación, inarticulado o confuso que suele causar una sensación auditiva desagradable y hasta dificultades para la salud (Hernández et al., 2019).

Entre las afecciones asociadas al ruido ambiental, el daño auditivo ocupa un lugar importante.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que:

- Más de 360 millones de personas en el mundo, sufren algún grado de discapacidad auditiva producida por el ruido.
- El 10 % de la población mundial está expuesta a niveles de presión sonora, que podrían causar hipoacusia.
- El 75 % de la población que habita en los grandes centros urbanos, está afectada por la contaminación acústica.

La directiva de la Comunidad Europea (CE) No. 49/2002 sobre el manejo del ruido ambiental, lo define como: "Sonido al aire libre no deseado o perjudicial creado por

las actividades humanas, se incluye el ruido por tráfico vehicular, trenes, aeropuertos y enclaves industriales(Hernandez2019ruido, n.d.)

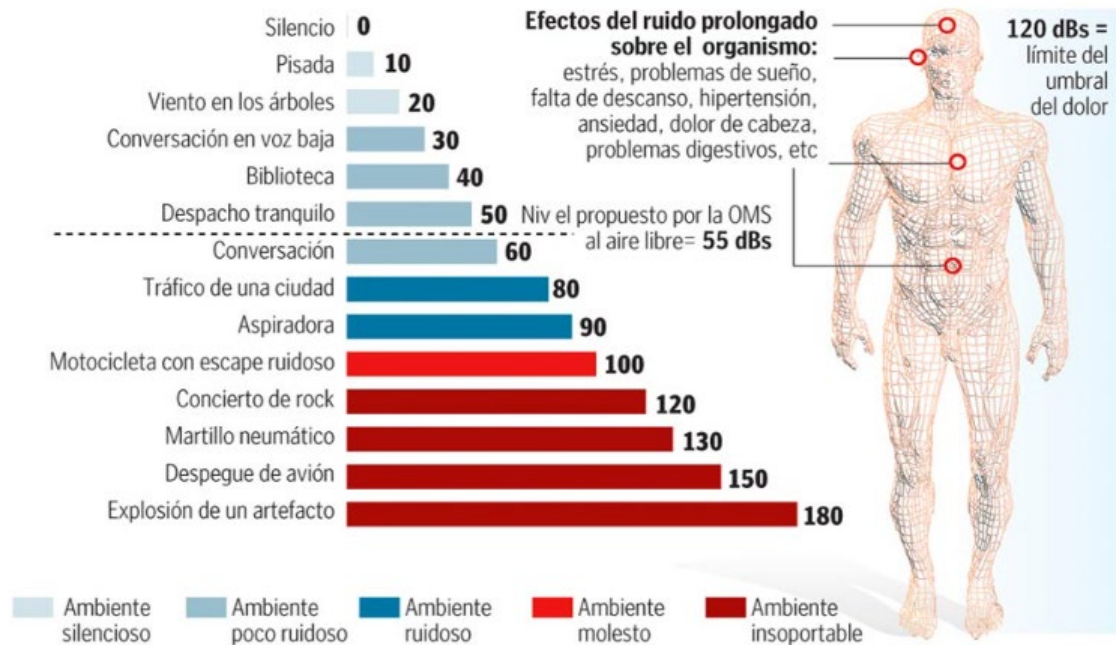


Figura 5: salud y niveles de ruido

Fuente: <https://www.europeanacustica.com/aislamiento-acustico/como-nos-afecta-el-ruido-a-la-salud>

2.6 RUIDO EN AEROGENERADORES

Las emisiones sonoras en aerogeneradores pueden tener dos orígenes diferentes: el ruido mecánico y el ruido aerodinámico.

2.6.1 Ruido mecánico

El ruido mecánico se genera principalmente por la caja de cambios, aunque también se puede producir por otros dispositivos como por ejemplo el generador propiamente dicho. El ruido mecánico tiene una energía dominante en las frecuencias por debajo de 1.000Hz y puede contener componentes de tono discreto. No obstante, el ruido y los tonos se pueden reducir de manera eficiente. En los generadores instalados durante los últimos 10 años, los fabricantes han sido capaces de disminuir el ruido mecánico a un nivel inferior al ruido aerodinámico. Esto se debe también al hecho de que el tamaño de las turbinas se ha incrementado y el ruido mecánico no aumenta tan raudamente con las dimensiones del aerogenerador como lo hace el ruido aerodinámico.

2.6.2 Ruido aerodinámico

El ruido aerodinámico es típicamente la parte dominante de ruido del generador eólico en la actualidad. Contiene un ruido de banda ancha y una modulación de amplitud. El ruido se origina principalmente por el flujo de aire alrededor de la parte exterior de las palas. Existe una fuerte relación entre la velocidad del viento y el ruido que producen las palas. A medida que aumenta la velocidad aumenta el ruido. A su vez, está directamente vinculado a la producción de energía, por lo tanto, es inevitable su existencia, a pesar de que se podría reducir en cierta medida modificando el diseño de las palas. (Henin, Iannace, Maffei, et al., 2010)

Habitualmente el ruido aerodinámico asociado al paso del aire sobre las palas es el principal componente del ruido aerodinámico. Se definen las siguientes fuentes de ruido aerodinámico, las cuales se identifican en la *Fig 6*.

- *Trailing Edge Noise* o el ruido aerodinámico generado en el borde de fuga de la pala cuando se produce la transición del flujo laminar a flujo turbulento. Es la principal fuente de ruido en las actuales, en el rango de frecuencias de 250-10kHz.

Amplitude modulation -AM: Los aerogeneradores genera un silbido que es la variación en banda ancha del ruido aerodinámico de las palas. La variación o modulación de los niveles sonoros sucede con la frecuencia de paso de las palas que es habitualmente sobre 1 Hz (2-6 dB). Normalmente el paso de la pala genera un pico en los niveles sonoros de unos pocos decibelios. Normalmente este incremento está asociado al *trailing Edge noise*. Sin embargo, en algunos casos, este pico (denominado según los términos anglosajones como *swishing* o *thumping*) se incrementa considerablemente y es habitualmente conocido como *amplitude modulation* o *AM*. En estos casos, las variaciones en los niveles sonoros son mayores de 6 dB y las variaciones son percibidas a largas distancias, a favor y en contra del viento. Además, aparece un cambio en las características del ruido, que se convierte en impulsivo y/o presenta mayor contenido de bajas frecuencias, que se pone en evidencia cuando las altas frecuencias son atenuadas. En la actualidad se atribuye al ruido de banda ancha causado por la rotación de la pala, particularmente en la zona de difusión del borde de la pala y el efecto *doppler* del movimiento de la pala hacia el receptor.

- Ruido del flujo turbulento de entrada: Esta fuente es debida al flujo turbulento en el frente de ataque de la pala, debido a la interacción con el borde de la pala. La frecuencia generada es habitualmente por debajo de 20 Hz.
- *Blade tip noise* o el ruido de la circulación del flujo por la extensión de la pala. Poco representativo respecto al resto de fuentes aerodinámicas.
- Interacción palas-torre: Ruido de tipo impulsivo fruto por la interacción de las palas con el flujo turbulento causado por la torre. Frecuencia de tipo infrasónica, pero de magnitud poco significativa en los actuales aerogeneradores.

- Ruido tonal resonancias de estructuras no aerodinámicas o flujo no laminar debido a desperfectos en el borde de fuga de la pala. Habitualmente no constituye un problema en aerogeneradores en buen estado (Grilo Bensusan, 2016)

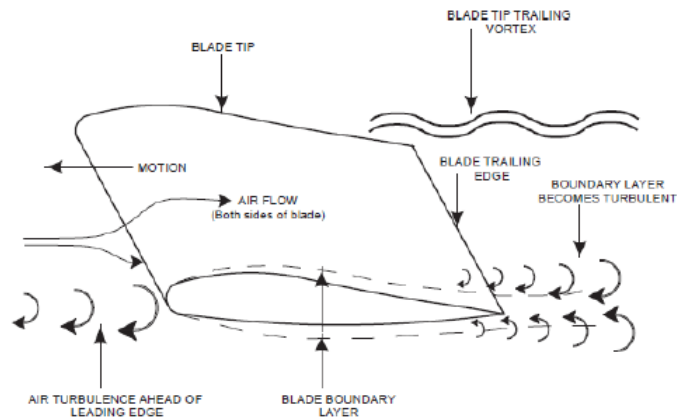


Figura 6. Diagrama de interacción del flujo de aire con la pala

Fuente: (Grilo Bensusan, 2016)

2.7 Estudio de ruido en aerogeneradores

Muchos estudios han abordado la reducción del ruido del perfil aerodinámico o de las turbinas eólicas. Debido a que el ruido de la turbulencia de entrada y el ruido del borde de salida se escalan con aproximadamente la quinta potencia de la velocidad de entrada del álabe local, un medio obvio para reducir el ruido es reducir el rpm del rotor o el diámetro del rotor. Sin embargo, estas medidas también reducen la potencia de salida de la turbina. Lo mismo vale para aumentar el ángulo de inclinación de las palas (es decir, girar el borde de ataque de las palas contra el viento): esto reduce el ángulo de ataque local y, por lo tanto, el ruido, pero (debido a la reducción de la sustentación) también la producción de energía. Por lo tanto, el desafío es lograr una reducción del ruido sin una reducción en la potencia de salida. Con respecto al ruido de la punta, que depende de las características del vórtice de la punta, se ha demostrado en varios estudios que la forma de la punta puede tener una influencia significativa en el ruido de una turbina eólica. La importancia del ruido de la turbulencia de entrada depende de la estructura de la turbulencia atmosférica y de la forma de las palas. Se ha demostrado tanto experimental como numéricamente que los niveles de ruido de turbulencia de flujo de entrada aumentan con el aumento de la nitidez del borde de ataque del perfil aerodinámico.

Con respecto al ruido del borde de salida, se han investigado varios conceptos de reducción. Después de que se demostró teóricamente que la eficiencia de la radiación acústica de un borde de salida puede reducirse mediante dientes (*Fig 7*), este concepto se investigó en una serie de estudios experimentales en superficies aerodinámicas 2D, modelo aerogeneradores y un aerogenerador a gran escala. se aplicaron dientes a un aerogenerador modelo de 16 m de diámetro y, dependiendo de las condiciones de flujo, se obtuvieron reducciones de ruido totales de hasta 3,5 dB. Para evitar un aumento del ruido a altas frecuencias, se descubrió que era fundamental alinear el plano de las estrías con el flujo del borde de salida. se aplicaron dientes a una turbina eólica de 1 MW y se obtuvo una reducción general del ruido de 2 a 3 dB, a pesar del aumento del ruido a altas frecuencias. Cabe señalar que las mediciones en solo se centraron en la posición horizontal (hacia abajo) de la hoja (90 grados), lo que puede dar una imagen incompleta. (Oerlemans et al., 2009)



Figura 7: Escalador quitando las protuberancias "trips" de la hoja dentada.
Fuente: (Oerlemans et al., 2009)

2.8 Propagación de onda sonora

Las variables para la caracterización de diferentes fuentes sonoras son la impedancia acústica, la intensidad del sonido y la potencia del sonido.

Impedancia acústica: Se caracteriza por la dependencia de la velocidad de desplazamiento de las partículas con posición de equilibrio y presión sonora. Además, la impedancia acústica (Z) es representada como una función de densidad (ρ) y velocidad del sonido (C), características de medio de propagación de ondas. Se representa con la ecuación (1). (Mota, 2018)

$$Z=\rho C \quad (1)$$

Intensidad de sonido: Se considera la cantidad promedio de energía por unidad de tiempo que pasa por un área unitaria perpendicular al área de propagación de ondas. Considerando un campo libre, donde no hay superficie reflectante, la intensidad del sonido (I) está representado por la ecuación (2). (Mota, 2018)

$$I = \frac{p_{eficaz}^2}{\rho C} \quad (2)$$

2.9 Tipo de fuentes sonoras

Neise y Michel (1994) detallaron cómo los diferentes fenómenos de flujo son relacionados con tres fuentes acústicas: monopolo, dipolo, cuádrupolo. En la (Fig 8) se encuentra el patrón de directividad del monopolo (a), que es un tipo de fuente que se caracteriza emitiendo sonido por igual en todas las direcciones; dipolo (b), que emite el sonido por dos monopolos en sentido contrario; cuádrupolo lateral © y cuádrupolo lineal (d) que son dos fuentes de dipolo que se desplazan de forma lateral y lineal.

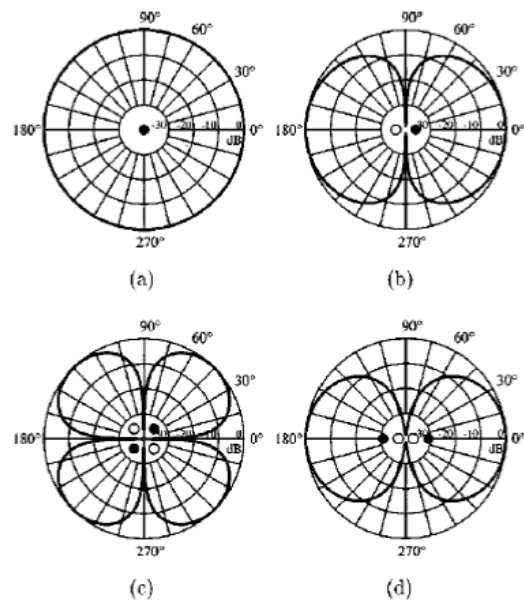


Figura 8: Patrones de directividad para niveles de presión sonora.

Fuente: (Russell et al., 1999)

Monopolo: Se caracteriza por el desplazamiento de la masa de fluido generada por fluctuaciones periódicas de presión en el dominio adyacente. Esta fuente también se conoce como ruido de espesor de la hoja y tiene un papel muy

importante en la generación de ruido en turbomáquinas que trabajan a altas velocidades como hélices y rotores de helicópteros (Henrique et al., 2018).

Dipolo: La fuente de tipo dipolo se caracteriza por el equilibrio de la cantidad de movimiento en la superficie de control. Esta fuente consta de dos fuentes monopolísticas de la misma fuerza, pero de fases opuestas y separadas por una pequeña distancia en comparación con la longitud de onda de sonido. A medida que una ola se expande, la otra fuente se contrae. Como resultado, el fluido cerca de las fuentes se mueve hacia adelante y hacia atrás, lo que da como resultado una producción de sonido (Henrique et al., 2018).

Cuadripolo: La fuente de cuadripolo se basa en la fuente resultante de las fluctuaciones de velocidad en el dominio del fluido. Además, consta de dos fuentes dipolo que pueden asumir una disposición lateral o lineal. Cuando los dos dipolos de fase opuesta no están colocados en la misma línea, hay una fuente de cuadripolo lateral que se caracteriza por la radiación sonora en la dirección frontal de cada fuente monopolo, el sonido se cancela en puntos equidistantes de los monopolos opuestos adyacentes. Sin embargo, cuando los dos dipolos de fase opuesta son posicionados a lo largo de la misma línea (Henrique et al., 2018).

2.10 Niveles de ruido

Así como hay un rango de frecuencia notable, también hay un rango de presión sonora que puede ser escuchada por los seres humanos, y esto se presenta como una gama muy amplia. Se define que la presión sonora perceptible por persona es aproximadamente $20 \times 10^{-6} \text{Pa}$. Además, una persona puede experimentar dolor a valores de presión sonora del orden de 60Pa . (Brayhan & Carmona, 2021.)

Debido a la gran escala del valor cuadrado de la presión acústica, una representación lineal no es adecuada. Por tanto, se adopta una escala logarítmica. La unidad medida *Bell* (en honor al físico Alexander Graham Bell) fue introducida, que representa una relación logarítmica entre dos cantidades, con un valor de referencia. Para evitar una escala corta a lo largo del rango de sensibilidad del escuchado, se introduce un factor de 10, dando lugar a la unidad de medida decibel (dB). Así, el nivel de presión (L_p) el nivel de potencia (L_W) y el nivel de intensidad (L_I) se pueden representar en dB como en las siguientes ecuaciones (3), (4) y (5) respectivamente.

$$L_W = 10 \log W + 120 \quad (3)$$

$$L_p = 20 \log P_{eficaz} + 94 \quad (4)$$

$$L_I = 10 \log I + 120 \quad (5)$$

Donde W , P_{eficaz} , I , están respectivamente, en unidades de W (vatios), Pa y W/m².

Para el estudio de las emisiones de ruido se utilizan espectros de banda ancha o de banda estrecha. Una de las características de estas bandas es que la banda estrecha puede, mediante un proceso de síntesis, convertirse en un espectro de banda ancha. Para obtener los valores efectivos de las presiones sonoras de las bandas anchas, se debe aplicar la ecuación (6). El espectro de sonido en bandas anchas o estrechas se representa en la (Fig 9). Donde los picos representan los tonos puros. (Brayhan & Carmona, 2021.)

$$P_{eficaz} = \left[\frac{\sum_{i=1}^N p_i^2}{N} \right]^{0,5} \quad (6)$$

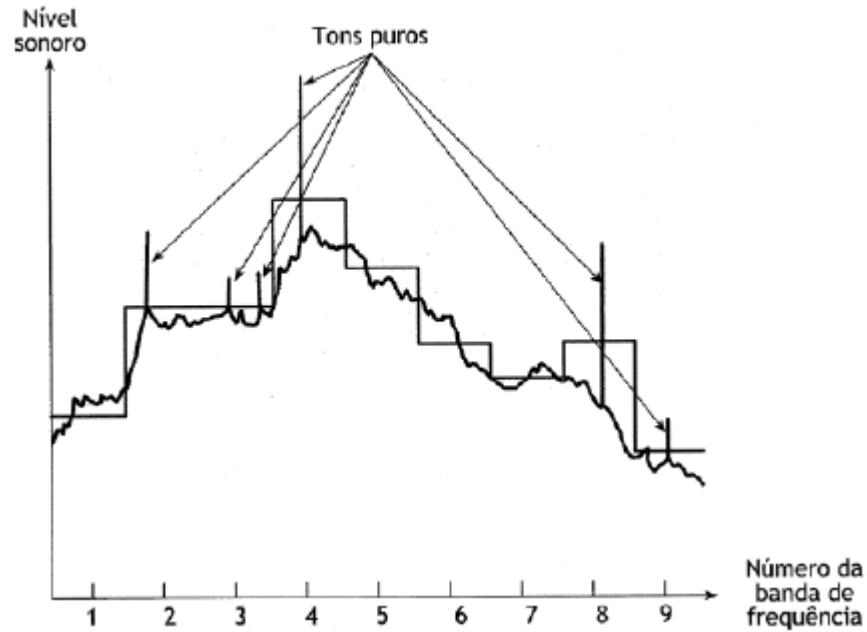


Figura 9: Espectro de sonido en banda ancha o banda estrecha.

Fuente: (Brayhan & Carmona, 2021.)

El valor de presión acústica también se puede calcular a partir de la ecuación (4); El nivel de presión sonora de banda ancha se calcula utilizando la Ecuación (5).

$$L_P = 10 \log \left[\sum_{i=1}^N 10^{\left(\frac{L_{p_i}}{10}\right)} \right] \quad (7)$$

La ecuación (7) obtiene el nivel de potencia sonora total. Este proceso también se puede utilizar para resumir los niveles de presión sonora emitida por más de una fuente, con el nivel total de presión sonora emitido por las fuentes se obtiene de la suma de los niveles totales de presión sonora de cada fuente. . (Brayhan & Carmona, 2021.)

3. METODOLOGIA

La metodología utilizada en este trabajo se basa en el estudio de diferentes referencias sobre el ruido en aerogeneradores y el posterior análisis mediante herramientas computacionales tal como lo muestra la (Fig 10) en la cual será detallada en los numerales siguientes

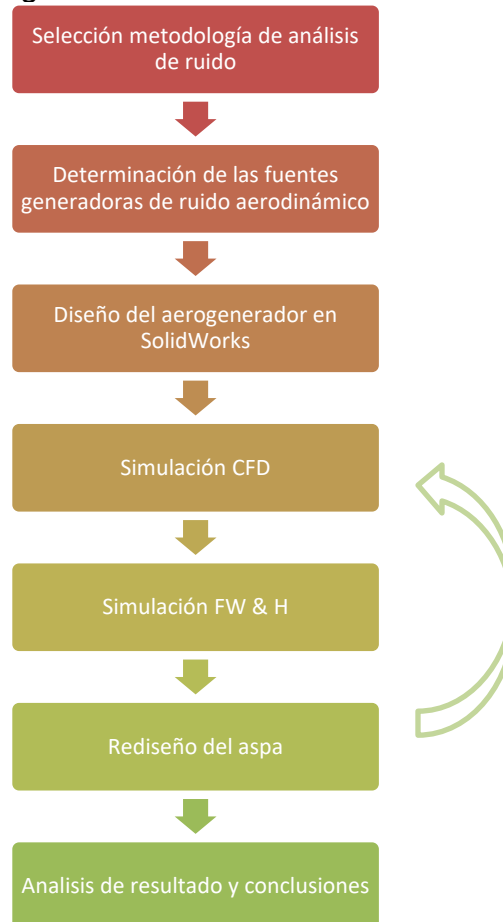


Figura 10: Metodología planteada

3.1 Selección de metodología

3.1.1 Modelos de propagación

La propagación acústica se puede modelar de forma analítica, empírica o computacional. Los cálculos de propagación siempre requieren algún modelo de la fuente acústica. Puede ser un único punto que represente la turbina, una fuente en movimiento distribuida a lo largo de los álabes o un campo fuente que varía en el tiempo y el espacio, generalmente obtenido a partir de un modelo transitorio. Por ejemplo, los parámetros aerodinámicos de la teoría del momento del elemento de pala se pueden utilizar en códigos de predicción acústica semi empíricos. También

se ha utilizado un método de panel aerodinámico tridimensional de bajo orden. Las predicciones acústicas más precisas requieren una solución aerodinámica detallada para determinar la presión fluctuante en la superficie de las palas y en el volumen circundante.

3.1.1.1 Analogía acústica de Lighthill.

El enfoque analítico más antiguo para modelar la propagación del ruido Aeroacústico fue el de Lighthill, donde las ecuaciones de Navier-Stokes para un flujo compresible se reorganizaron en una ecuación de onda no homogénea en términos de densidad dada por,

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} - c_0^2 \nabla^2 \rho = \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} T_{ij} \quad (8)$$

El lado derecho de esta expresión a menudo se describe como un término fuente, donde T_{ij} se denomina tensor de tensión de Lighthill. Se puede pensar que el lado izquierdo de esta ecuación modela la propagación de la onda acústica en los dominios espacial y temporal para un medio en reposo. T_{ij} representa las tensiones internas fluctuantes y se define como,

$$T_{ij} = \rho u_i u_j + p_{ij} - c_0^2 \rho \delta_{ij} \quad (9)$$

El primer término de esta cantidad es el producto de componentes de velocidad fluctuantes y se conoce como tensión de Reynolds. El segundo término es el tensor de tensión que incluye tensiones viscosas,

$$p_{ij} = \rho' \delta_{ij} - \sigma_{ij} \quad (10)$$

donde $p' = p - p_0$ es la presión acústica.

La formulación de Lighthill se conoce como analogía acústica y las soluciones son soluciones exactas de las ecuaciones de Navier-Stokes. Sin embargo, al interpretar el estrés. Los términos descritos asumen que las fluctuaciones acústicas no influyen significativamente en el flujo de fluido (lo que generalmente es cierto para flujos de bajo número de Mach), que la fuente de sonido es estacionaria y que las ondas de sonido se irradian hacia el espacio libre. Suponiendo una densidad atmosférica ambiental constante, la ecuación de Lighthill se puede transformar en una expresión para las fluctuaciones de presión.

Los métodos numéricos directos resuelven la propagación de la onda en todo el dominio, donde la ecuación de la onda acústica anterior o la ecuación de Euler linealizada se resuelve utilizando un enfoque numérico, como un solucionador de diferencias finitas. Esto es computacionalmente costoso y produce grandes conjuntos de datos. Como resultado, los métodos directos rara vez se utilizan para problemas acústicos.

3.1.1.2 Analogía Ffowcs-Williams & Hawkings.

Ffowcs Williams y Hawkings predijeron el sonido generado usando fuentes acústicas equivalentes al método de la integral de Lighthill. Los históricos de presión sonora o las señales acústicas se calculan por medio de una integral de superficie. (Vaca Rios, 2017).

La incapacidad para describir superficies móviles y volúmenes móviles limita la aplicación de la analogía de Lighthill para las aspas de turbinas eólicas giratorias. Ffowcs-Williams y Hawkings (FW-H) extendieron la ecuación de Lighthill permitiendo el estudio del ruido generado por superficies en movimiento.

$$\frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 \rho'}{\partial t^2} - \nabla^2 \rho' = \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \{ T_{ij} H(f) \} - \frac{\partial}{\partial x_i} \{ [p_{ij} n_j + \rho u_i (u_n - v_n)] \delta(f) \} + \frac{\partial}{\partial t} \{ [\rho_0 v_n + \rho (u_n - v_n)] \delta(f) \} \quad (11)$$

donde f define la superficie matemática de un cuerpo en movimiento tal que $f < 0$ dentro del cuerpo y $f > 0$ fuera. $\delta(f)$ es la función delta de Dirac y $H(f)$ es la función Heaviside. n_i es el vector unitario en la dirección i , u_n es la velocidad del fluido normal a la superficie de integración $f=0$ y v_n es la velocidad superficial normal a la superficie. p_{ij} es la presión acústica en el campo lejano. ρ' es la presión acústica en el campo cercano. Resolviendo la ecuación FW-H en cada punto de la cuadrícula en un dominio fluido requiere una cuadrícula computacional fina, por lo tanto, es computacionalmente costosa.

El lado derecho de la ecuación FW-H puede interpretarse como la suma de tres fuentes acústicas. El primer término es un cuadrupolo generado por tensiones de Reynolds fluctuantes en un volumen alrededor del álabe en el tensor de Lighthill. (Lighthill, 1952.)

Los cuadrupolos tienen cuatro lóbulos de directividad y son débiles emisores de sonido. Este término está relacionado con el producto de la velocidad fluctuante en el flujo fuera de la superficie y, en general, se puede esperar que sea generado por escalas turbulentas, que son pequeñas en comparación con la cuerda y, por lo tanto, es probable que produzca ruido de banda ancha de frecuencia relativamente alta.

Se puede demostrar usando la formulación de Lighthill que la intensidad acústica de la turbulencia en el espacio libre a alguna distancia r está dada por.

$$I_a \propto \rho c^3 M^8 \left(\frac{l}{r}\right)^2 I^2 \quad (12)$$

Donde l es una escala de longitud característica de la región turbulenta. Esta relación muestra que la intensidad es proporcional a la octava potencia del número de Mach. La contribución es pequeña cuando el número de Mach es bajo ($\ll 1$), lo cual es cierto para la mayoría de las secciones de los álabes HAWT. A menudo, las fuentes de cuadrupolo se descartan del cálculo, ya que se supone que no tienen una contribución acústica significativa a un receptor de campo lejano con números de Mach bajos.

El segundo término en la ecuación FW-H está relacionado con una fuente de dipolo acústico generada por fuerzas fluctuantes que actúan sobre la superficie del álabe (cuando $\delta(f) = 1$). (Wagner 2012)

Los dipolos tienen dos lóbulos en su patrón de directividad y es probable que sean la fuente dominante de ruido generado por las palas en muchos casos. Este tipo de sonido también se conoce como "ruido de carga".

El ruido de entrada turbulento es un dipolo que se puede estimar suponiendo que cada sección del álabe es una placa plana y que solo las fluctuaciones normales a la superficie del álabe (placa) son importantes para el sonido radiado. Esto lleva a:

$$I_a \propto \rho c^3 M^6 \left(\frac{A_s}{A_r}\right)^2 I^2 \cos^2(\Phi) \quad (13)$$

donde A_s y A_r son el área de la sección del álabe y el área del rotor respectivamente. El factor de directividad que genera la distribución dipolar del sonido es una función de Φ , que se mide normal a la dirección de la envergadura de la pala. Este ruido de entrada es una función del número de Mach elevado a la sexta potencia.

El ruido de borde de ataque y de fuga también se puede estimar utilizando una formulación de dispersión para ser.

$$I_a \propto \rho c^3 M^5 \left(\frac{sl}{r^2}\right) I^2 \cos^3(\Psi) \sin^2(\Theta/2) \quad (14)$$

donde s es la envergadura de la sección del álabe y Θ se mide normal a la cuerda. Esto muestra una relación para la intensidad acústica que depende del número de Mach elevado a la quinta potencia y, por lo tanto, en una ubicación dada del receptor, la intensidad del sonido ha decaído menos que otras fuentes para números de Mach bajos. El mismo resultado se usa en un modelo más simple (aunque mucho menos usado) de Grosveld que asume que el sonido es generado por una fuente puntual en el cubo de la turbina. (Zhao et al., 2019)

El término FW-H final puede interpretarse como una fuente monopolar que también ocurre en la superficie móvil. Un monopolo tiene como mecanismo físico la dilatación, que se origina a partir de un cambio de volumen. Los monopolos son radiadores omnidireccionales y eficientes. Este término a menudo se denomina "ruido de espesor", ya que se asocia con desplazamiento del aire por el espesor de la pala.

En el análisis acústico de una turbina eólica, a menudo el requisito es predecir el ruido en un único punto receptor ubicado en el campo lejano. (Farassat, 1981) calculó analíticamente el ruido utilizando la teoría de funciones generalizadas y la función de espacio libre de Green. Los códigos WOPWOP y PSU WOPWOP han demostrado la aplicabilidad de este método para la predicción del ruido de los rotores de helicópteros (despreciando los términos del cuadrupolo). En este caso la presión acústica total en una ubicación de receptor de campo lejano viene dada por la combinación de una contribución de espesor y una contribución de carga en la superficie aerodinámica. (Zhao et al., 2019)

$$p' = p'_T + p'_L \quad (15)$$

donde la contribución del espesor del alabe (p'_T) es,

$$4\pi p'_T(x, t) = \int_{f=0} \left[\frac{\rho_0(\dot{u}_n + u_n)}{r(1-M_r)^2} \right]_{ret} ds + \int_{f=0} \left[\frac{\rho_0 u_n \{r\dot{M}_r + c_0(M_r - M^2)\}}{r^2(1-M_r)^3} \right]_{ret} ds \quad (16)$$

M_r es el número de Mach de un punto sobre la superficie en movimiento y r es la distancia al observador. El subíndice *ret.* denota que las integrales se calculan en los tiempos retardados correspondientes, $t_{ret} = t - r/c_0$, donde t es el tiempo del observador. El punto sobre una variable representa la derivada fuente-tiempo de esa variable. (Zhao et al., 2019)

La contribución de carga (p'_L) es

$$4\pi p'_L(x, t) = \frac{1}{c_0} \int_{f=0} \left[\frac{\dot{L}_r}{r(1-M_r)^2} \right]_{ret} ds + \int_{f=0} \left[\frac{L_r - L_M}{r^2(1-M_r)^2} \right]_{ret} ds + \frac{1}{c_0} \int_{f=0} \left[\frac{L_r \{r\dot{M}_r + c_0(M_r - M^2)\}}{r(1-M_r)^3} \right]_{ret} ds \quad (17)$$

donde u_i y L_i se dan como,

$$u_i = v_i + \frac{\rho}{\rho_0}(u_i - v_i) \quad (18)$$

$$L_i = p_{ij}\delta_{ij}n_j + pu_i(u_n - v_n) \quad (19)$$

Se puede encontrar una derivación detallada de estas expresiones en otro trabajo de (Farassat, 1981) Este método es computacionalmente eficiente en comparación con un cálculo directo.

Se requiere una solución de campo de flujo de alta precisión cerca de la superficie Para las evaluaciones de fuentes utilizando la formulación de (Farassat, 1981). Esto a menudo se logra resolviendo las ecuaciones incompresibles de Navier-Stokes, lo cual es válido para las predicciones acústicas de un objeto compacto. Un objeto acústico compacto es una región que tiene una longitud característica mucho más pequeña en comparación con las longitudes de onda acústicas de interés. Sin embargo, tal solución incompresible no resuelve la onda acústica que se propaga a lo largo de la superficie y, por lo tanto, ignora los efectos de auto dispersión y puede producir datos de fuente de superficie erróneos. Goldstein sugirió que una función de Green adaptada a la geometría es más apropiada para resolver este problema. (Zhao et al., 2019)

En este trabajo se utilizó la analogía de Ffowcs-Williams & Hawkings. Debido a su aplicabilidad en el estudio del ruido en superficies en movimiento y el uso de la herramienta ANSYS proporcionado por la universidad la cual utiliza internamente esta metodología para el análisis de ruido.

3.2 Fuentes de ruido aerodinámico en aerogeneradores

De acuerdo con las características del ruido emitido, un aerogenerador puede tener los siguientes tipos de emisión de ruido.

3.2.1 Emisión de ruido debido al desprendimiento de los vórtices de la capa límite laminar en el borde de salida:

A números de Reynolds bajos ($Re < 10^5$), se desarrolla en gran medida una capa límite laminar sobre la superficie aerodinámica del aspa, cuya inestabilidad produce el desprendimiento de los vórtices y el ruido asociado al borde de salida.

Para los aerogeneradores esta fuente puede o no ser relevante dado que la velocidad de la punta del aspa es diferente de la velocidad de la base. Este hecho es aún más relevante para los aerogeneradores de gran tamaño (envergadura del aspa ≈ 40 m), donde el flujo laminar difícilmente podría existir en la punta, pero si puede ocurrir en la base. (Presidente et al., n.d.-a)

Esta fuente de ruido depende de la forma y el espesor del perfil aerodinámico del borde de salida. Si el espesor del borde de salida es mayor que el espesor de la capa límite en el borde posterior, esta fuente será dominante en el ruido global. Por esta razón, para reducir los niveles de potencia sonora, deben utilizarse los bordes de salida aerodinámicos en las aspas de los aerogeneradores.(Presidente et al., n.d.-a)

3.2.2 Emisión de ruido debido al desprendimiento de la capa límite turbulenta en el borde de salida:

Es el ruido producido por la interacción entre la capa límite turbulenta y el borde de salida del aspa. El ruido es generado por la convección de la capa límite turbulenta adjunta al aspa dentro de la estela de la superficie aerodinámica y que en el borde de salida se desprende. (Hubbard & Shepherd, n.d.)

La capa límite turbulenta toma lugar con un número de Reynolds alto y/o ángulos moderados de ataque. A números de Reynolds altos, la capa límite turbulenta se desarrolla sobre la mayor parte de la superficie aerodinámica. El ruido se produce a medida que esa capa límite turbulenta se desprende desde el borde de salida.(Brooks et al., 1989)

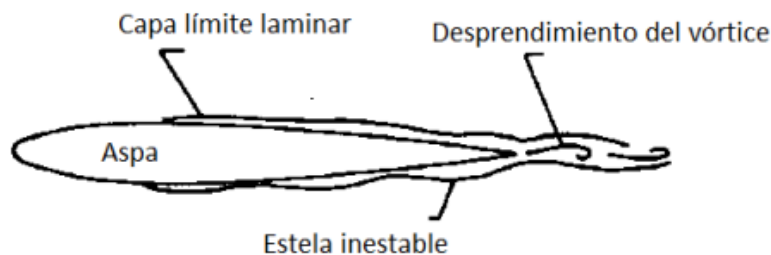


Figura 11: Desprendimiento de los vórtices de la capa límite laminar en el borde
Fuente:(presidente et al., n.d.)

Cuando la superficie aerodinámica del aspa se desplaza con ángulos de ataque altos ocurre la separación de la capa límite, y se le denomina nivel de potencia sonora debido a la separación de la capa límite (*stall*). En el lado de succión de la superficie aerodinámica, bajo el espesor de la capa límite, las estructuras turbulentas se forman y dominan la producción de ruido. En condiciones de parada, el ruido puede ser 10 dB más alto que el irradiado por la capa límite turbulenta a ángulos de ataque bajos.(Presidente et al., n.d.-b)

3.2.3 Emisión de ruido debido a la formación del vórtice en la punta del aspa:

Dado que no existen límites alrededor de la punta del aspa, el flujo asume una característica tridimensional en esta región promovida por el diferencial de presión entre las superficies aerodinámicas. El flujo converge desde el lado de presión hacia el lado de succión formando un vórtice en la punta como se muestra en la *Fig 12*. Este vórtice presenta un núcleo turbulento que reforzará la emisión de ruido al conducir esta turbulencia sobre el borde hacia la región de la estela del rotor. (Presidente et al., n.d.-b)



Figura 12: Formación del vórtice en la punta del aspa
Fuente: (Presidente et al., n.d.-a)

3.2.4 Emisión de ruido debido al flujo turbulento incidente:

Aunque esta fuente de ruido es intrínsecamente aerodinámica, tiene que ver más con la capa límite atmosférica y las condiciones de flujo viento arriba, que con el propio perfil aerodinámico. Por esta razón se considera aparte de las otras fuentes aerodinámicas (Presidente et al., n.d.-b)

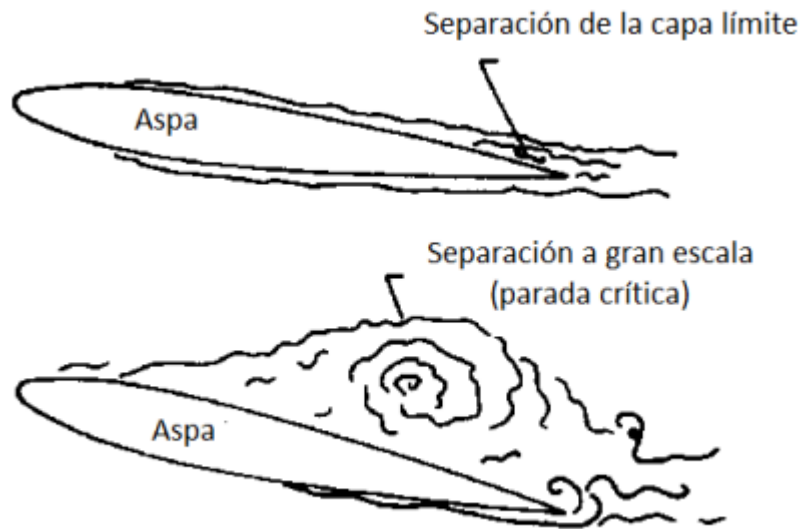


Figura 13: Separación de la capa límite (stall)
Fuente: (Presidente et al., n.d.-a)

Este ruido, que depende de las condiciones atmosféricas, es causado por la interacción entre las aspas y el flujo turbulento del viento. La turbulencia atmosférica provoca variaciones del ángulo de ataque en las aspas de los aerogeneradores y esto a su vez causa fluctuaciones en las fuerzas de sustentación y resistencia (Hubbard & Shepherd, n.d.)

Las escalas de longitud e intensidad de la turbulencia son una función del gradiente de temperatura (condiciones atmosféricas) y la interacción con la superficie del suelo (condiciones locales); y varían con la altura sobre el suelo. La variación de la turbulencia induce la formación de vórtices. Cuando estos vórtices inciden sobre el borde de ataque de las aspas, interactúan de diferentes formas en función de su escala espacial relativa a las dimensiones del perfil. El ruido de baja o de alta frecuencia se produce a continuación, si el tamaño del vórtice es mayor o menor, respectivamente, que la longitud de la cuerda del segmento, lo que significa que la cuerda es un parámetro importante. El flujo de aire incidente da lugar a la producción del ruido de banda ancha (Presidente et al., n.d.-a)

Según (Grosveld, 1985) existen tres fuentes principales de ruido en los aerogeneradores

Flujo turbulento incidente: Producido por las fluctuaciones de carga aerodinámicas causadas por la turbulencia del flujo de aire incidente al interactuar con las aspas.

Desprendimiento de la capa límite turbulenta en el borde de salida: Producido por el flujo turbulento desarrollado en la capa límite sobre la superficie aerodinámica del asa al desprenderse en el borde de salida.

Desprendimiento de los vórtices de la capa límite laminar en el borde de salida: Producido por los vórtices causados por la turbulencia en el borde de salida.

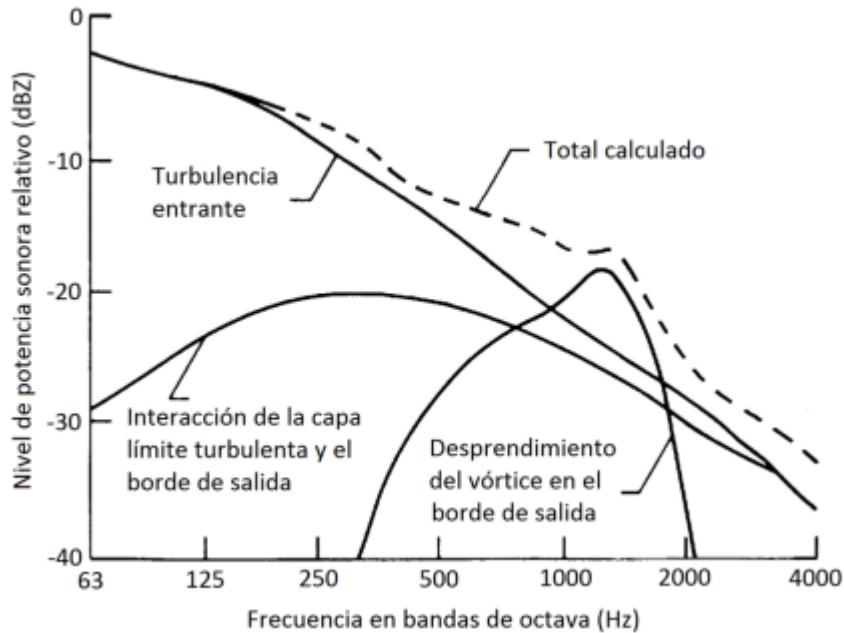


Figura 14: Contribuciones relativas de las diferentes fuentes de ruido al espectro
Fuente: (Grosveld, 1985)

Como podemos observar en la (Fig 14) el ruido aerodinámico predominante es el ruido producido por la interacción de la capa límite turbulenta y el borde de salida por lo que en este trabajo se procederá a atacar este ruido en específico.

3.3 Diseño del aerogenerador

Para este trabajo se utilizó una geometría de los álabes que es determinada acoplando los perfiles aerodinámicos; WORTMANN FX 60-126, SG043 y SG042, para la raíz, la región media y para la punta del álabe, respectivamente. Estos perfiles aerodinámicos son acoplados mediante interpolación geométrica, con la ayuda del software SOLIDWORKS.(Conde Pabón, 2020)

Dicha geometría es extraída de un artículo donde se presenta la simulación de un aerogenerador de eje horizontal de tres álabes, para baja velocidad y baja potencia, mediante la ayuda de un software comercial de CFD. (Conde Pabón, 2020) Ver Fig 15 y Fig 16. con el fin de continuar los estudios realizados a dicha geometría.

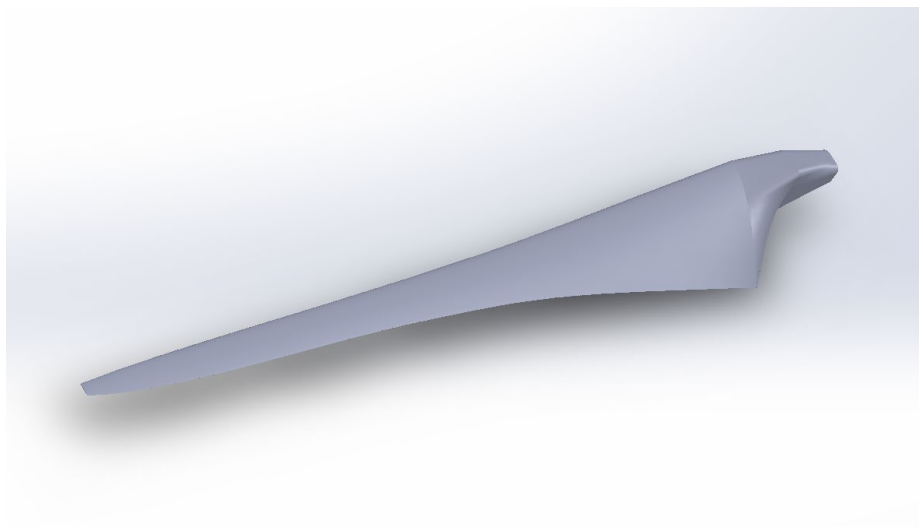


Figura 15 Geometría del alabe



Figura 16 Geometría del aerogenerador

3.4 Simulación CFD

3.4.1 Dominio de análisis

El FLUENT de ANSYS, permite simular casos que involucran dominios fijos y móviles simultáneamente. Uno de los sistemas de referencia más utilizados es el MRF (Marco de Referencia Múltiple). Este método utiliza por lo menos uno estacionario (externo) y uno transitorio (interno); En lugar de que las aspas se muevan físicamente a través del aire, el aire se mueve alrededor de las aspas del rotor con una velocidad angular correspondiente. Incluso para los casos en los que se requiere una simulación transitoria, el método MRF es útil para obtener valores iniciales para simulaciones dependientes del tiempo porque el estado pseudoestacionario se puede alcanzar en unas pocas revoluciones a partir de la velocidad inicial cero. El enfoque MFR es apropiado si el flujo visto desde el marco de referencia giratorio / móvil es constante a lo largo de la interfaz. En otras palabras, cuando el flujo es relativamente uniforme en la interfaz entre las zonas móviles y estacionarias (ANSYS inc, 2019).

Para el dominio se tuvo en cuenta la teoría de relación de diámetros. En esta se debe tener en cuenta que el volumen de control. El cual debe ser lo suficientemente grande para incluir todos los efectos del viento tal como lo hizo (2019_Tesis_Andres_Sierra_Guerrero, n.d.) y como se muestra en la Fig 17 y Fig 18. Donde D es el diámetro del aerogenerador

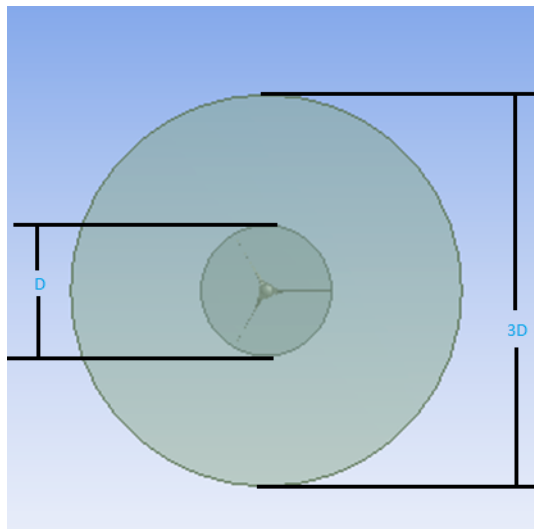


Figura 17 Vista frontal dimensiones del volumen de control

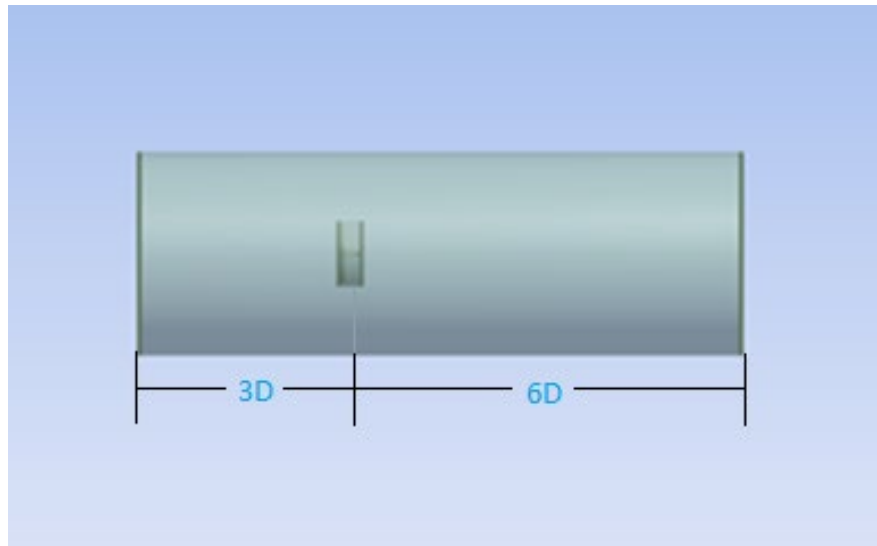


Figura 18 Vista lateral dimensiones del volumen de control

Tabla 2 Parámetros para la construcción del volumen de control

Parámetros	Longitud (m)
D	1,56
3D	4,58
6D	9,36

3.4.2 Generación la malla

3.4.2.1 Calidad de la malla

La calidad de la malla generada se evalúa en función de los parámetros de calidad: oblicuidad y ortogonalidad. El primero se basa en la diferencia entre la forma de la celda y la forma de una celda equilátera de volumen equivalente. Los valores superiores a 0,95 puede obstaculizar la convergencia de la solución y, por lo tanto, disminuir la precisión de los resultados. La ortogonalidad por otro lado, es la relación entre la diagonal más grande y la más pequeña de una celda, donde se recomiendan valores mayores a 0,15 pero para dar credibilidad de resultados, es pertinente utilizar valores mayores a 0,70. Los valores se presentan en la *Tabla 3* para determinar la calidad de la malla con estos dos parámetros. Tener celdas o elementos defectuosos, puede conducir a resultados de simulación incorrectos (Brayhan & Carmona, n.d.)

Tabla 3 Valores para determinar calidad de malla.

Fuente:(Ardila-Marín et al., 2016)

Espectro de métricas de malla: oblicuidad					
Excelente	Muy buena	Buena	Aceptable	Malo	Inaceptable
0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.80	0.80-0.94	0.95-0.97	0.98-1.00

Espectro de métricas de malla: OQ					
Inaceptable	Malo	Aceptable	Buena	Muy buena	Excelente
0-0.001	0.001-0.14	0.15-0.20	0.20-0.69	0.70-0.95	0.95-1.00

De igual manera para generar una malla más refinada y obtener datos muchos más exactos se realizó un análisis de convergencia como lo muestra donde podemos observar que después de los 7.800.000 elementos el torque se mantiene constante por lo que podemos decir que 7.800.000 elementos es una malla confiable para la simulación tal como se muestra en la *Fig 19*

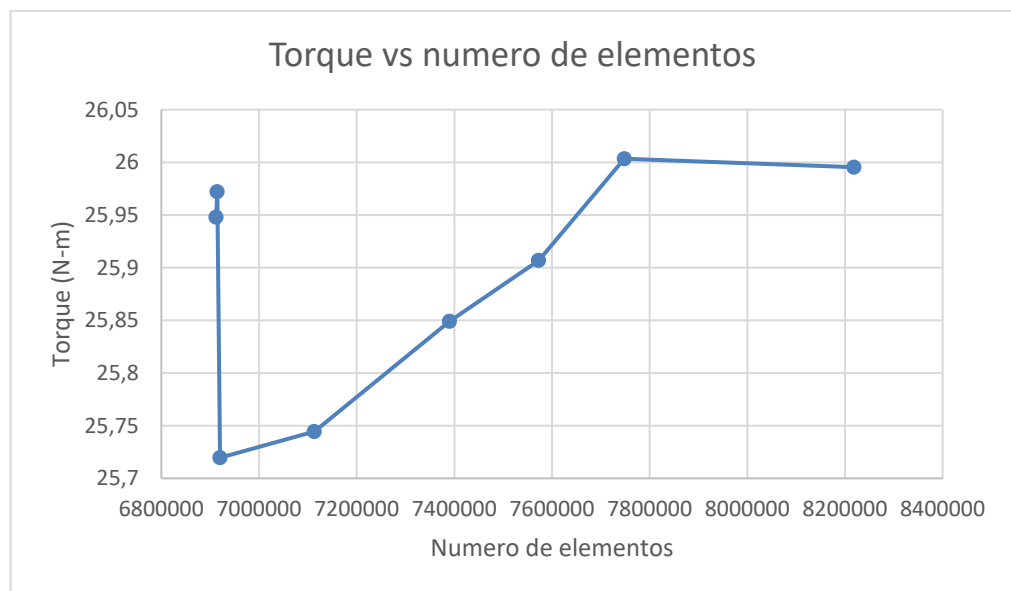


Figura 19 Análisis de convergencia del mallado

3.4.2.2 Mallado.

Teniendo en cuenta lo expuesto en la sección anterior se procede a realizar el mallado de la geometría.

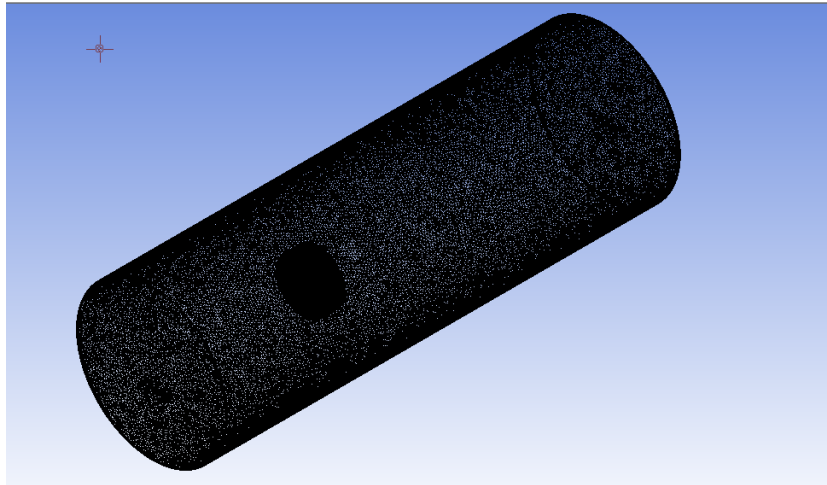


Figura 20: Malla del volumen de control

En la *Fig 20* se muestra la malla del volumen de control con la cantidad de elementos que cumplen con el análisis de convergencia de mallado mostrado en la *Fig 19*

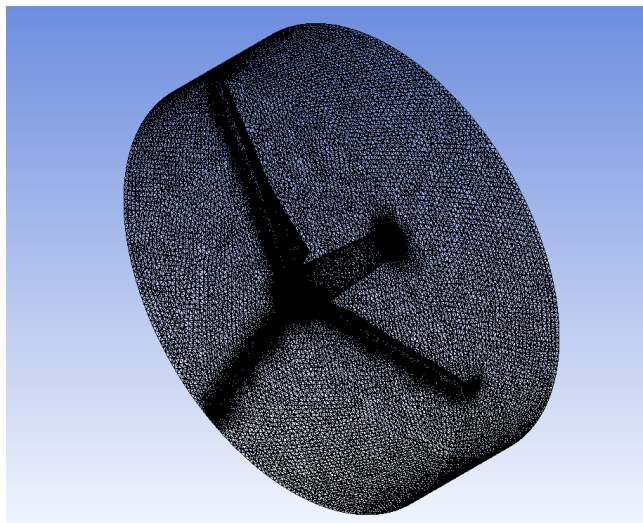


Figura 21: Malla del marco de referencia del aerogenerador

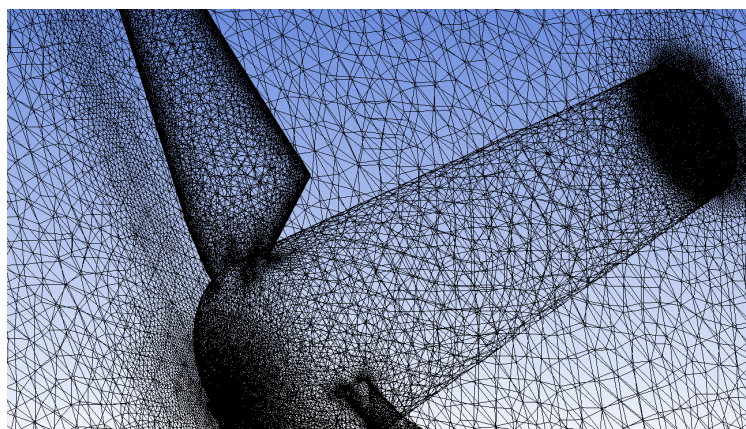


Figura 22: Zoom para la malla del aerogenerador

Los valores sobre la cantidad de elementos y nodos utilizados se plasman en la *Tabla 4*

Tabla 4: Número de elementos y nodos en los dominios

DOMINIO	CANTIDAD DE ELEMENTOS	CANTIDAD DE NODOS
Marco de referencia de rotación	7090394	1592994
Sistema	8218323	1922402

Para corroborar la calidad de la malla se evalúa con los valores de referencia que se encuentran para la oblicuidad y la ortogonalidad donde una calidad de malla excelente debe estar entre 0 - 0,25 y aceptable menos de 0,94 para la oblicuidad. Para la ortogonalidad debe ser máximo de 1 para una malla excelente y aceptable entre 0,15 - 0,20. Como se muestra en la *Tabla 3*.

Tabla 5: Oblicuidad de la malla

Mesh Metric	Skewness
☐ Min	3,1992e-009
☐ Max	0,98876
☐ Average	0,246
☐ Standard Deviation	0,15144

Tabla 6: Ortogonalidad de la malla

Mesh Metric	Orthogonal Quality
☒ Min	1,1245e-002
☐ Max	0,99773
☐ Average	0,75278
☐ Standard Deviation	0,15012

Como podemos observar en la *Tabla 5* y la *Tabla 6* y comparando con los datos de la *Tabla 3*. Se obtuvo una malla con buena calidad para la simulación obteniendo datos correctos y confiables para este trabajo.

3.4.3 Modelos de turbulencia

Los modelos de turbulencia establecidos por el FLUENT de ANSYS, se basan en las ecuaciones RANS y las ecuaciones de LES y DNS. La *Fig 25* muestra una pirámide de gasto computaciones de los distintos modelos de viscosidad, donde las ecuaciones RANS y URANS tiene menor tiempo de cálculo, pero más aproximaciones; Como consecuencia del costo computacional, los enfoques de resolución de escala como DNS y LES generalmente se aplican a geometrías simples y configuraciones académicas, mientras que los híbridos RANS-LES, URANS y RANS se pueden aplicar a problemas industriales complejos. (Richmond, 2019).

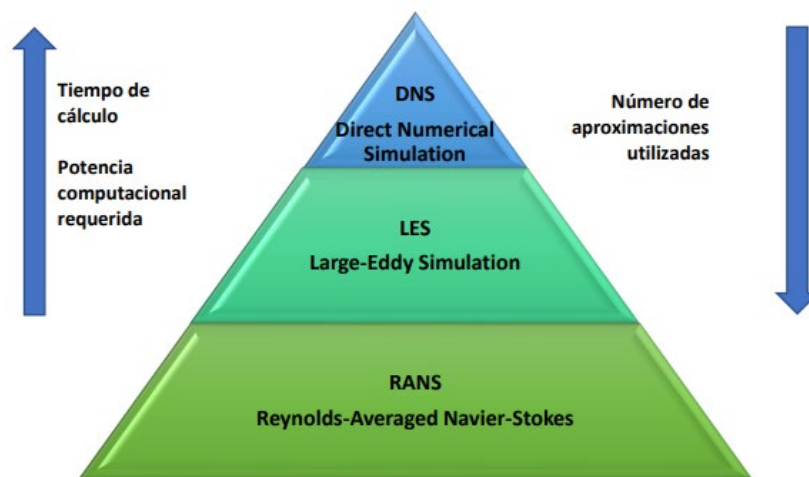


Figura 23 Modelos de turbulencia
Fuente: (TFG-I-890, n.d.)

Tabla 7 Modelos de turbulencia RANS más comunes
Fuente: (TFG-I-890, n.d.)

Cierre	Modelo	Ecuaciones adicionales	Características
EVM	Zero Equation Model	0	Método totalmente algebraico. Flujos libres: chorros, capas de mezcla y flujos externos sobre cilindros.
	Spalart-Allmaras	1	Aplicaciones aeroespaciales con flujos compresibles a altas velocidades.
	k- ϵ Standard	2	Robusto. Uso general.
	k- ϵ RNG	2	Flujos rápidamente deformados y turbulentos.
	k- ϵ Realizable	2	Chorros planos y cilíndricos, capas límite bajo fuertes incrementos de presión adversos, flujos con separación y recirculación.
	k- ω Standard	2	Bajos números de Reynolds, contornos de pared, capa límite y flujos no estacionarios.
	k- ω SST	2	Incrementos de presión adversos en perfiles aerodinámicos y ondas de choque transitorio.
RSM	Tensiones de Reynolds	7	Flujos tridimensionales complejos con elevada turbulencia y rotación. Requiere elevada potencia de cálculo y capacidad de memoria.

k- ϵ Standard

Es el modelo de turbulencia más común y es usado con frecuencia en aplicaciones industriales por su robustez y por su bajo costo computacional. A pesar que no se desempeña bien en casos de fuertes gradientes de presión adversa. Consiste en resolver dos ecuaciones adicionales: para el transporte de energía cinética turbulenta k (que determina la energía en la turbulencia) y para la tasa de disipación de la energía cinética turbulenta ϵ (que determina la escala de la turbulencia). Esto le permite considerar efectos en la historia del flujo como convección y difusión de la energía turbulenta (Gustavo & Navarro, n.d.)

El modelo utilizado en la dinámica de fluidos computacional para simular las condiciones de flujo turbulento es k- ϵ Standard, que consta de dos ecuaciones, que proporcionan una descripción general de la turbulencia por medio de las ecuaciones de transporte (PDE) que representan las propiedades turbulentas del flujo, teniendo en cuenta efectos como la convección y la difusión de energía turbulenta (ANDRES SIERRA GUERERRO, 2019).

Debido a los estudios realizados por (Revilla de Lozar, Javier, 2014.) sobre Análisis CFD bidimensional y tridimensional de turbinas de viento tipo H-Darrieus con

perfiles NACA 0025. y (Brayhan & Carmona, 2021.) sobre determinación del ruido de un ventilador doméstico mediante herramientas computacionales. En donde utilizaron el modelo k- ϵ Standard para simular las condiciones de flujo turbulento y por el bajo costo computacional requerido, se utilizó el modelo de viscosidad k- ϵ Standard para el desarrollo de este trabajo. Tal como se muestra en la *Fig 26* .

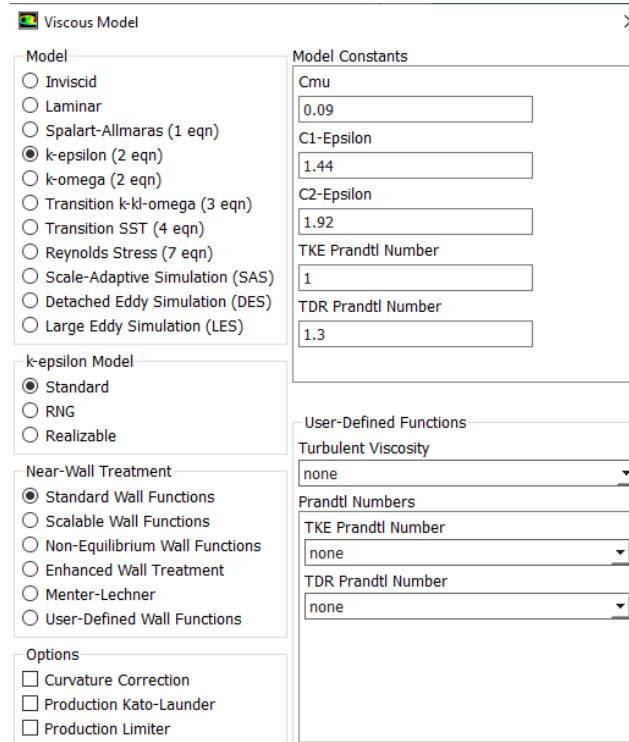


Figura 24: Modelo y parámetros de simulación

Esta metodología se llevó a cabo utilizando la herramienta computacional ANSYS para el análisis aerodinámico. Utilizando aire con una densidad (masa específica) de 1,225 kg/m³, una viscosidad dinámica de 1,7894e⁻⁵ kg/m-s y una velocidad de entrada de 10 m/s

Cuando se habilita un movimiento de rotación en un dominio sólido, la escala de tiempo se calcula como $1/\omega$. Donde ω es la velocidad angular en revoluciones por segundos (*System Coupling User's Guide*, 2022).

Para este trabajo ese utilizo una velocidad angular de 400 rpm y teniendo en cuenta que Para la simulación de modelos acústicos se requiere pasos de tiempo pequeños para cada revolución del aerogenerador. Se utilizaron 620 pasos de tiempo obteniendo los resultados de la *Tabla 8* para los valores del paso del tiempo.

Tabla 8: valores de paso del tiempo

Velocidad (RPM)	Tamaño de paso del tiempo (s)	Números de paso del tiempo	Iteraciones máximas
400	0,00025	620	18

3.5 Simulación FW & H

Luego de calcular la simulación CFD el cual duró aproximadamente 20 horas, se procede a habilitar la analogía acústica FW & H. definiendo las fuentes de ruido que sería el aerogenerador. En la *Fig 27* se muestra los datos utilizados para dicha habilitación del modelo de analogía acústica.

Acoustics Model

Model

☐ Off

☒ Ffowcs-Williams & Hawkings

☐ Broadband Noise Sources

Export Options

☒ Export Acoustic Source Data in ASD Format

☐ Export Acoustic Source Data in CGNS Format

☐ Compute Acoustic Signals Simultaneously

Define Sources... Define Receivers...

Ffowcs-Williams & Hawkings Options

☒ Convective Effects

Model Constants

Far-Field Density (kg/m3)

1.225

Far-Field Sound Speed (m/s)

340

Free Stream Velocity (m/s)

0

Free Stream Direction X Component

1

Free Stream Direction Y Component

0

Free Stream Direction Z Component

0

Reference Acoustic Pressure (pascal)

2e-05

OK Apply Cancel Help

Figura 25: habilitación analogía acústica

3.5.1 Posición de mediciones acústicas

3.5.1.1 Norma IEC 61400-11.

Esta parte de la norma IEC 61400 presenta los procedimientos de medición que permiten caracterizar las emisiones de ruido de una turbina eólica. Esto implica el uso de métodos de medición adecuados a la evaluación de emisión de ruido en los lugares cerca de la máquina, a fin de evitar errores debidos a la propagación del sonido, pero lo suficientemente lejos para considerar el tamaño de la fuente como finita. Los procedimientos de los métodos presentados por la norma, permiten caracterizar las emisiones de ruido de un único aerogenerador de una manera coherente y precisa. (Henin, Iannace, & Maffei, 2010)

3.5.1.2 Posición de micrófonos.

Según (Henin, Iannace, & Maffei, 2010) se utiliza una posición de referencia y opcionalmente otras tres. Las cuatro posiciones deberán estar dispuestas según un patrón estándar de medición con respecto al eje vertical de la torre de la turbina de viento, La posición de medición requerida a favor del viento es identificada como la posición de referencia, como se muestra en la *Fig 28*.

La dirección de las posiciones deberá tener una precisión de $\pm 15^\circ$ relativa a la dirección del viento en el momento de la medición. La distancia horizontal R_0 desde la línea central vertical de la torre de la turbina de viento a cada posición del micrófono deberá ser como se representa también en la *Fig 28*, con una tolerancia del 20% y se medirá con una precisión de $\pm 2\%$. (Henin, Iannace, & Maffei, 2010).

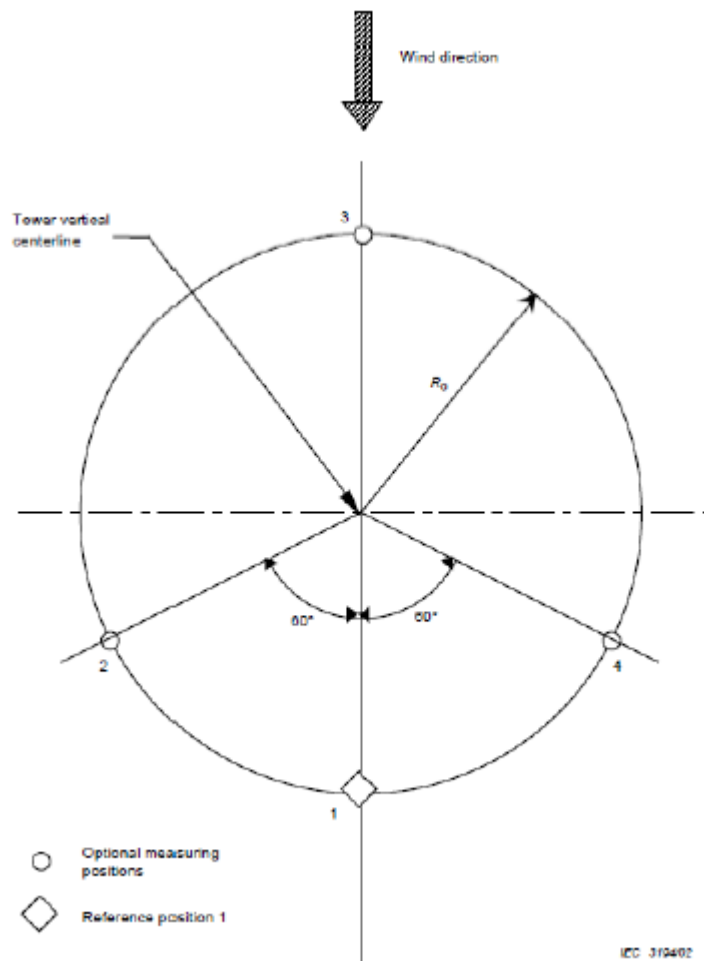


Figura 26: Patrón estándar de medición para las posiciones
Fuente: (Henin, Iannace, & Maffei, 2010)

En la Fig 29 se muestra la distancia de referencia R_0 para los generadores de eje horizontal dada por:

$$R_0 = H + \frac{D}{2} \quad (20)$$

Donde:

H es la distancia vertical desde el nivel del suelo hasta el centro del rotor.

D es el diámetro del rotor

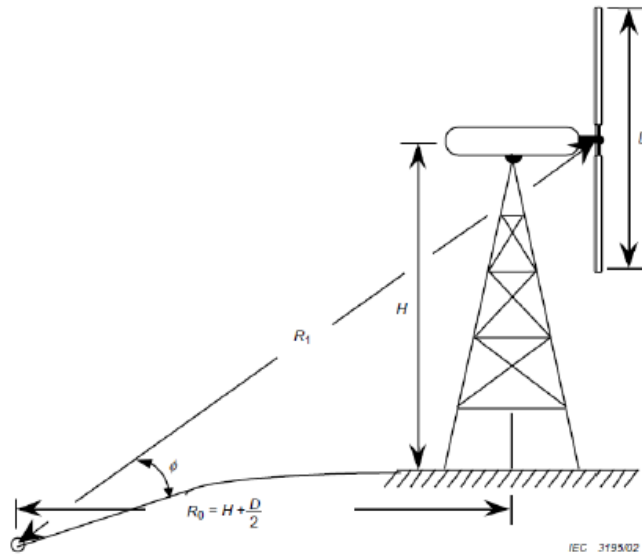


Figura 27: Aerogenerador de eje horizontal
Fuente: (Henin, Iannace, & Maffei, 2010)

Para el análisis Aeroacústico de este trabajo se utilizó solamente el micrófono principal en la posición de referencia tal como lo muestra la Fig 28

Tabla 9: Valores de referencia posición micrófono

PARAMETROS	VALORES
H	1.5D
D	1,56 (m)

Utilizando los valores de la Tabla 9 y remplazando en la ecuación (20) obtenemos un $R_0 = 3,12(m)$ para la posición del micrófono de referencia el cual se ubica en el eje z en dirección negativa tal como se muestra en la Fig 30.

Acoustic Receivers

☐ Moving Receivers

Number of Receivers 1

Name	X-Coord. (m)	Y-Coord. (m)	Z-Coord. (m)	Signal File Name
receiver-1	0	0	-3.12	receiver-1.ard

OK
Cancel
Help

Figura 28: Posición micrófonos

Con los resultados obtenidos de la simulación CFD y habilitado el modelo acústico FW&H se dispone a simular nuevamente la cual se demoró aproximadamente 24 horas para un total de 44 horas de simulación.

3.5.2 Cálculos con decibelios (dB)

Para operar con decibelios debe tenerse en cuenta que su escala es logarítmica y por lo tanto, las sumas, restas y promedios logarítmicos difieren con respecto a las operaciones aritméticas elementales.(Cortés, n.d.)

3.5.2.1 Adición de niveles de presión acústica (suma logarítmica)

La unidad operativa del ruido es el decibelio, dB, que es un valor adimensional. Las sumas logarítmicas se realizan del siguiente modo:

$$L_{PA,TOTAL} = 10 \log \sum_{n=1}^N 10^{L_{PA,n}/10} \quad (21)$$

Donde: $L_{PA,n}$ son los niveles de presión acústica generados por cada fuente.

3.5.2.2 Corrección por ruido de fondo (resta logarítmica)

La resta de decibelios es útil para obtener el nivel de presión acústica generado por una máquina que está ubicada junto a otras también ruidosas. Es necesario medir el nivel de presión acústica total (condiciones habituales con la máquina en marcha) y también efectuar la medición del nivel de presión acústica de fondo (con la máquina parada). Con los valores obtenidos en dicha medición, ha de usarse la expresión:

$$L_{PA,TOTAL} = 10 \log \left(10^{\frac{L_{PA,1}}{10}} - 10^{\frac{L_{PA,2}}{10}} \right) \quad (22)$$

Donde: $L_{PA,1}$ es el nivel de presión acústica mayor

$L_{PA,2}$ es el nivel de presión sonora menor (Cortés, n.d.)

4. RESULTADOS

4.1 Geometría de referencia.

En el caso de la geometría de referencia obtuvimos los siguientes resultados tanto en la simulación CFD (*Fig 31*) en la cual se aprecia las líneas de corriente (Streamline) de velocidad del aerogenerador. como en la FW&H (*Fig 32*). Donde se ven los contornos de energía cinética turbulenta.

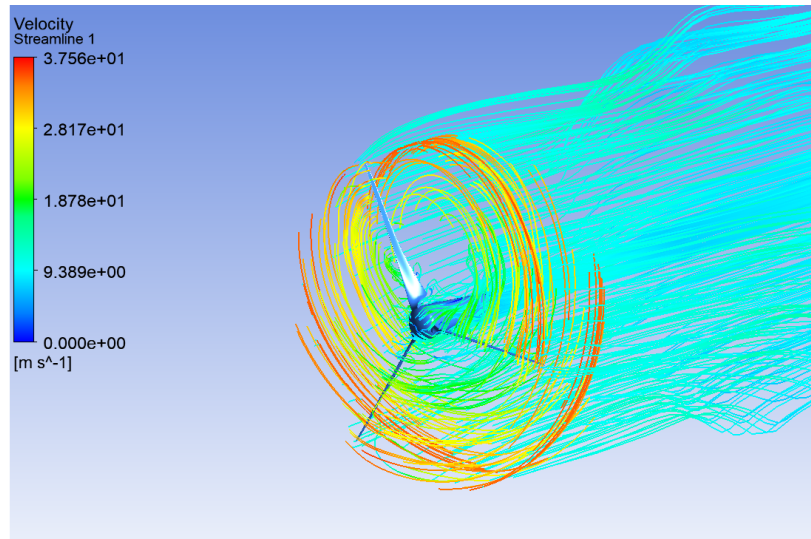


Figura 29: Streamline de velocidad

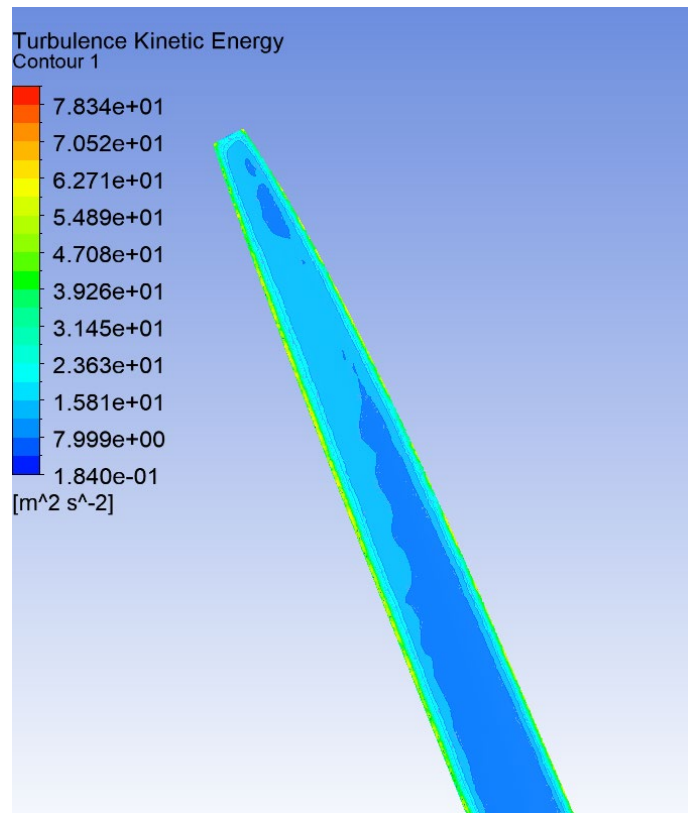


Figura 30: Energía cinética turbulenta geometría de referencia.

En la *Fig 32* podemos observar que la energía cinética turbulenta se presenta principalmente en el borde de ataque y el borde de salida en donde este último genera ruido por desprendimiento de la capa límite turbulenta según lo estudiado en el inciso 3.2.2.

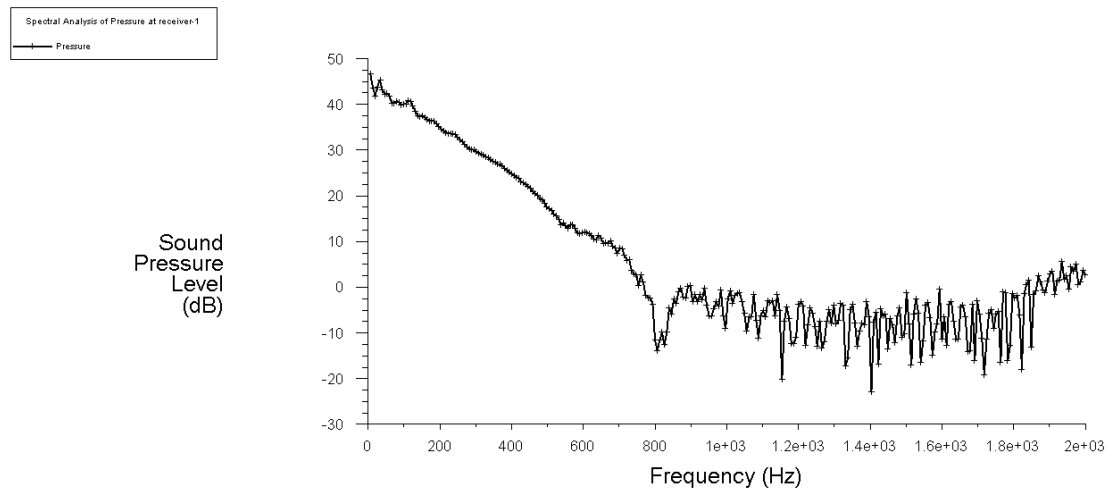


Figura 31: Espectro de presión sonora en la geometría de referencia

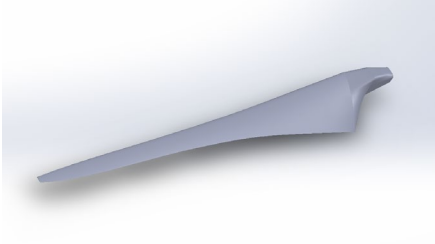
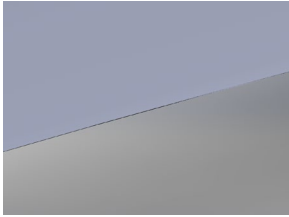
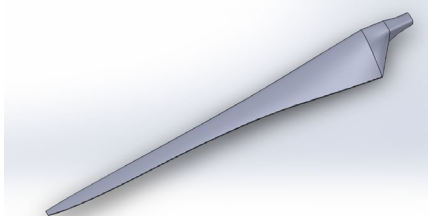
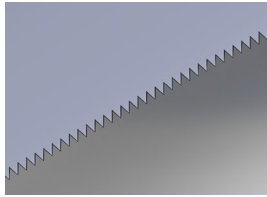
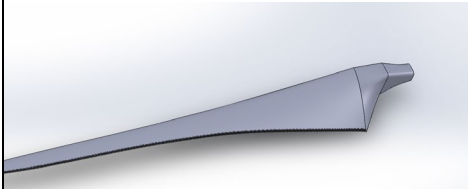
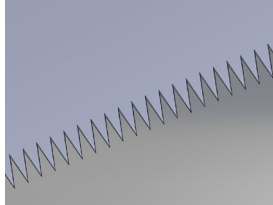
La Fig 33 muestra los espectros de presión sonora del aerogenerador de referencia con una velocidad angular de 400 RPM. En la tabla encontraremos el nivel de presión sonora los cuales fueron obtenidos en ANSYS FLUENT calculando el área bajo la curva de la gráfica de presión sonora y el torque el cual fue obtenido directamente de ANSYS FLUENT ver anexo 9.2 Fig 42 y anexo 9.3 Fig 45 respectivamente.

Tabla 10: Valores torque y ruido geometría de referencia

Datos	Valores
Torque (N-m)	25,97
Ruido (dB)	64,3631

Aplicando la teoría estudiada en el inciso 2.7 sobre la aplicación de espinas en el borde de salida para la reducción del ruido aerodinámico. Se procede a realizar un rediseño del alabe del aerogenerador agregando espinas relativamente pequeñas a lo largo del alabe y otro agregando espinas, pero esta vez más grandes que las del rediseño 1. Ver *Tabla 11*

Tabla 11: Comparación diseños del alabe

Geometría de referencia		
Rediseño 1		
Rediseño 2		

Para la realización de las simulaciones CFD y FW&H se tomaron los mismos valores de referencia para el aire del volumen de control, paso del tiempo ver

Tabla 8 y posición de los micrófonos ver *Tabla 9*, (*Fig 30*)

De igual manera se establecieron valores para obtención de una malla con buena calidad que cumpla los valores establecidos en la *Tabla 3* para la obtención de una simulación correcta y con valores confiables. Ver anexo 9.1, *Fig 39* y *Fig 41* Dichos valores son plasmados en la *Tabla 12*.

Tabla 12: Calidad de malla para rediseños

	Oblicuidad		Ortogonalidad		Número de elementos	Numero de nodos
Rediseño 1	Mesh Metric	Skewness	Mesh Metric	Orthogonal Quality	7850561	1438410
	☐ Min	4,59e-009	☐ Min	3,4088e-003		
	☐ Max	0,99659	☐ Max	0,99786		
	☐ Average	0,22934	☐ Average	0,76933		
	☐ Standard Deviation	0,13917	☐ Standard Deviation	0,13767		
Rediseño 2	Mesh Metric	Skewness	Mesh Metric	Orthogonal Quality	7935567	1508650
	☐ Min	1,0624e-010	☐ Min	2,2715e-003		
	☐ Max	0,99773	☐ Max	0,99719		
	☐ Average	0,20974	☐ Average	0,78885		
	☐ Standard Deviation	0,12285	☐ Standard Deviation	0,12123		

4.2 Resultados rediseño 1.

Para el rediseño 1. se obtuvieron los siguientes valores para la energía cinética turbulenta. Donde podemos apreciar una disminución en dichos valores ver *Fig 34*.

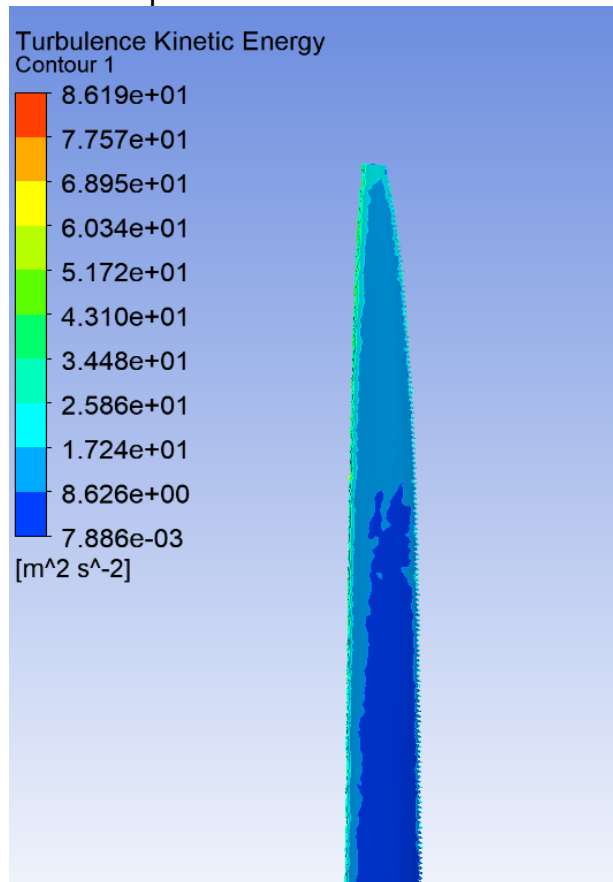


Figura 32: Energía cinética turbulenta rediseño 1

En la Fig 35 se puede apreciar los datos de los espectros de presión sonora, para el primer rediseño utilizando una velocidad de 400 RPM, la misma posición del micrófono y velocidad del viento.

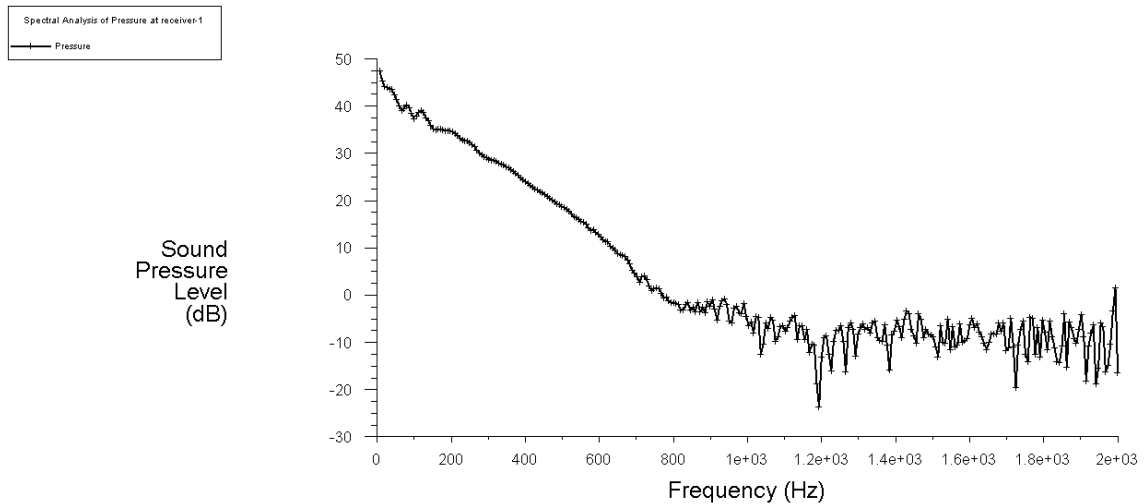


Figura 33: *Espectro de presión sonora en el rediseño 1*

En la *Tabla 13* se muestra los datos obtenidos del área bajo la curva en la gráfica de presión sonora y los datos obtenidos por ANSYS FLUENT sobre torque.

Tabla 13: Valores torque y ruido rediseño 1

Datos	Valores
Torque (N/m)	24,16
Ruido (dB)	64,0232

4.3 Resultados rediseño 2.

Para el rediseño 2. obtuvimos los siguientes valores para la energía cinética turbulenta. Donde podemos apreciar una disminución mayor que las del rediseño 1 ver *Fig 36*

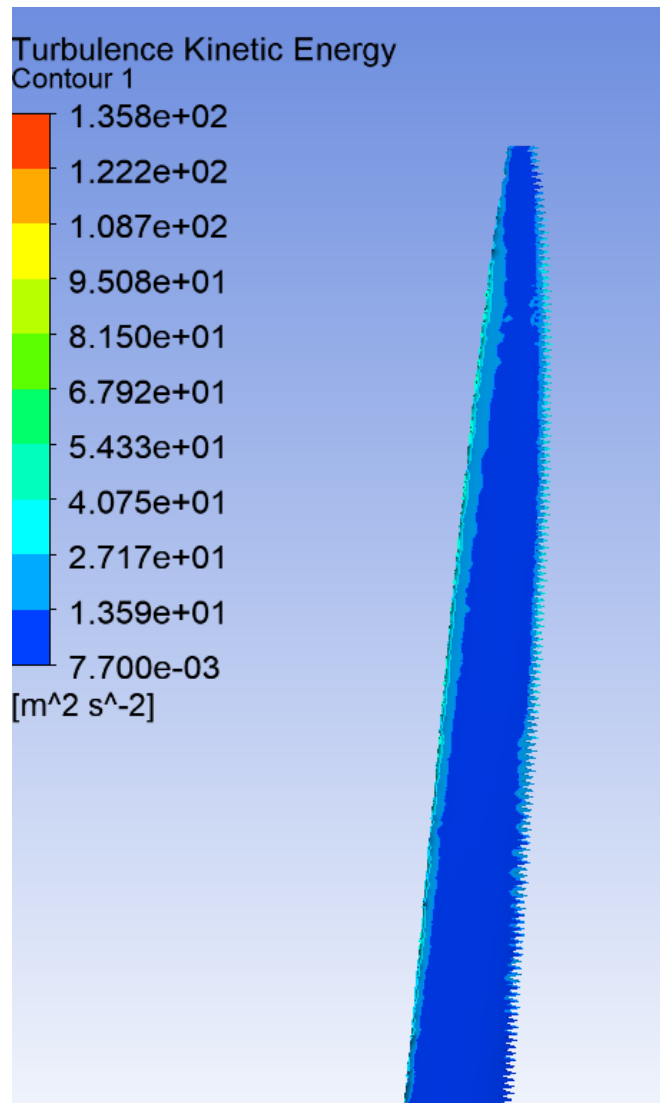


Figura 34: Energía cinética turbulenta rediseño 2

De igual manera que el rediseño 1 se obtuvieron los datos de los espectros de presión sonora, utilizando una velocidad de 400 RPM, la misma posición del micrófono, velocidad del viento, el área bajo la curva en la gráfica de presión sonora y los datos obtenidos por ANSYS FLUENT sobre torque ver la *Fig 37* y la *Tabla 14*.

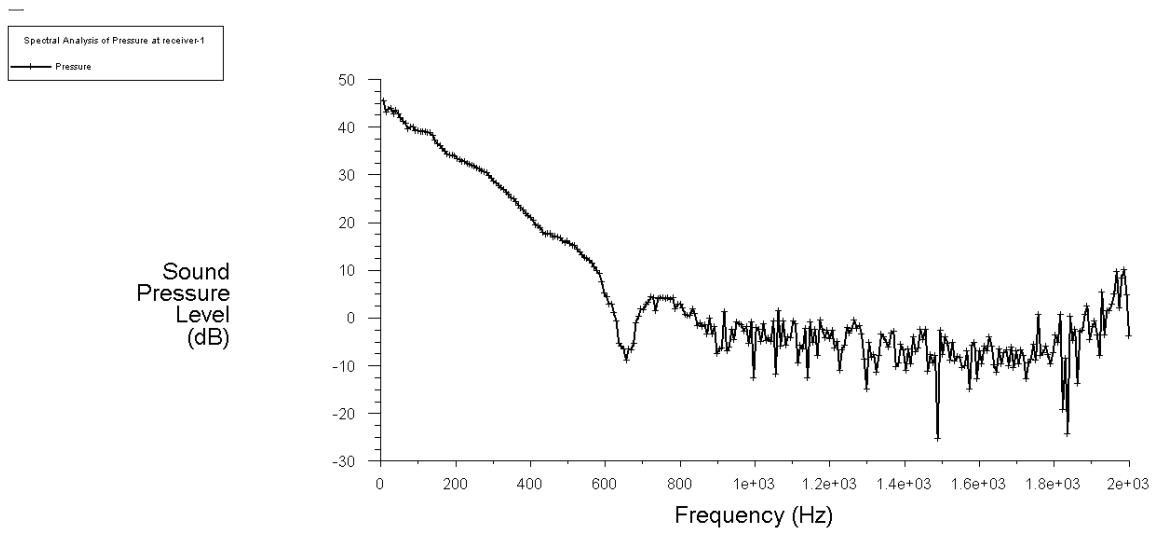


Figura 35: Espectro de presión sonora en el rediseño 2

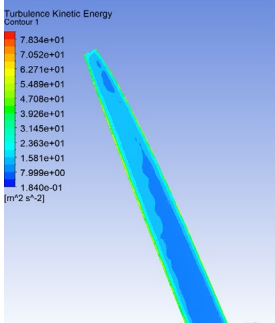
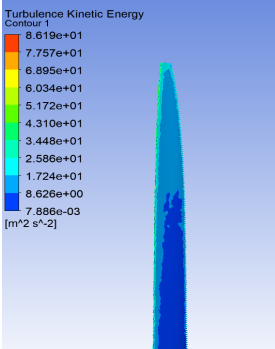
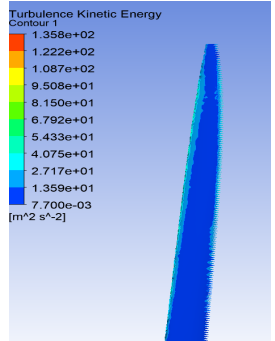
Tabla 14: Valores torque y ruido rediseño 2

Datos	Valores
Torque (N-m)	21,52
Ruido (dB)	63,0125

5. ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS

En la *Tabla 15* se muestran la comparación de las gráficas obtenidas para la turbulencia de energía cinética.

Tabla 15: comparación energía cinética turbulenta

Diseño	Energía cinética turbulenta.
Geometría referencia	
Rediseño 1	
Rediseño 2	

Al comparar los resultados de la *Tabla 15* sobre energía cinética turbulenta. Podemos observar la dimisión de la zona de incidencia al aplicar espinas en el borde de salida. De igual manera se aprecia que al tener unas espinas más grandes se disminuye aún más las zonas de incidencia. Por lo tanto, una disminución del ruido aerodinámico generado por el desprendimiento de la capa límite turbulenta en el borde de salida como se muestra en la *Tabla 16*.

Tabla 16: Comparación resultados torque y ruido.

Geometría	Ruido (dB)	Torque (N-m)
Referencia	64,3631	25,97
Rediseño 1	64,0232	24,16
Rediseño 2	63,0125	21,52

Realizando una resta de decibels entre la geometría de referencia y cada rediseño utilizando la ecuación (22) del inciso 3.5.2.2 obtenemos la disminución de ruido en cada uno de los rediseños planteados los cuales se encuentran en la *Tabla 17*.

Tabla 17: Disminución de ruido y torque

Geometría	Disminución de ruido (dB)	Disminución torque (%)
Rediseño 1	53,1299	6.96%
Rediseño 2	58,6327	17,13%

Otro parámetro importante que debemos analizar es el torque. En la *Tabla 16* muestra la comparación del torque en cada uno de los casos donde podemos observar que la disminución del ruido es directamente proporcional a la disminución del torque.

Al aumentar demasiado el tamaño de los dientes se pueden tener pérdidas significativas de la potencia eólica del aerogenerador ya que disminuye en gran porcentaje el torque tal como se muestra en *Tabla 17*.

Podemos observar una reducción en los niveles de presión sonora utilizando la metodología estudiada en el inciso 2.7 donde se aplicaron dientes a una turbina eólica de 1 MW y se obtuvo una reducción general del ruido de 2 a 3 dB, a pesar del aumento del ruido a altas frecuencias. Cabe señalar que las mediciones en solo se centraron en la posición horizontal (hacia abajo) de la hoja (90 grados), lo que puede dar una imagen incompleta.

6. CONCLUSIONES

Durante la obtención y el estudio del material bibliográfico es importante investigar muy a fondo debido a que existe muy poca bibliografía confiable para el análisis Aeroacústico por medio del software ANSYS. por lo que se debe estudiar muy bien la bibliografía existente. Ya que de estas dependen la correcta recolección de datos.

se mostraron conceptos básicos de la geometría y Aeroacústica de un generador eólico de eje horizontal para identificar Las principales fuentes generadoras de ruido mediante herramientas computacionales, conceptos obtenidos del material bibliográfico.

En el transcurso de este trabajo se comprueba la importancia de las herramientas computacionales en la ingeniería hoy en día para observar detalladamente la influencia de las diferentes variables que actúan sobre los aerogeneradores y poder obtener una metodología para disminuir el ruido aerodinámico presente en los aerogeneradores de eje horizontal. Como también el gran reto de simular los efectos físicos que están presentes dentro del ruido aerodinámico.

Al momento de realizar simulaciones. Los costos computacionales son indispensables para obtener resultados más exactos a los efectos físicos que se presentan. Entre mayor es el tiempo de simulación, pasos de tiempo, y más refinada sea la malla se obtienen mejores resultados debido a la complejidad de la geometría y una mayor exactitud al momento de resolver las ecuaciones. Como también disminución en los tiempos de simulación al tener mayores recursos computacionales.

Se comprobó que la metodología utilizada para el análisis Aeroacústico y para la disminución del ruido aerodinámico en los aerogeneradores de eje horizontal fue acertada ya que se evidencio una disminución en los niveles de presión sonora.

La metodología utilizada para la reducción de los niveles de presión sonora también puede traer sus puntos negativos debido a la disminución del torque si no se tienen en cuenta el tamaño de las espigas por lo que se debe encontrar un equilibrio entre el tamaño de las espigas, el torque y los niveles de presión sonora para no afectar el rendimiento energético del aerogenerador.

7. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Si se desea continuar con esta investigación. Es indispensable utilizar un túnel de viento y herramientas para recrear cada uno de los diseños utilizados del aerogenerador a escala. para obtener datos experimentales y poder realizar una comparación con los datos obtenidos mediante las herramientas computacionales comprobando así la eficiencia de la metodología planteada.

Es necesario contar con una gran capacidad computacional, lo cual permite obtener datos más exactos, aplicación de otros modelos de turbulencia que requieren mayor capacidad computacional como lo es el modelo LES el cual entrega los datos con una mayor exactitud.

Podría realizarse una investigación sobre el ruido generado por la formación del vórtice en la punta del aspa, debido a que es un ruido aerodinámico presente en el alabe del aerogenerador y su disminución en conjunto con la disminución del ruido aerodinámico generado por el desprendimiento de la capa límite turbulenta en el borde de salida se obtendría una disminución de ruido mayor a la obtenida.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 2019_Tesis_Andres_Sierra_Guerrero. (n.d.).
- ANDRÉS SIERRA GUERERRO. (2019). *ANÁLISIS DE UN AEROGENERADOR PARA BAJAS VELOCIDADES DEL VIENTO. Annual-Wind-Report-2022_screen_final_April*. (n.d.).
- Ardila-Marín, J. G., Hincapié-Zuluaga, D. A., & Sierra-del-Río, J. A. (2016). INDEPENDENCIA DE MALLA EN TUBOS TORSIONADOS PARA INTERCAMBIO DE CALOR: CASO DE ESTUDIO. *Revista de La Facultad de Ciencias*, 5(1), 124–140. <https://doi.org/10.15446/rev.fac.cienc.v5n1.54231>
- Brayhan, A., & Carmona, D. G. (n.d.). *DETERMINACIÓN DEL RUIDO DE UN VENTILADOR DOMÉSTICO MEDIANTE HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES PROGRAMA DE INGENIERIA MECANICA DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA, MECATRONICA E INDUSTRIAL FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURAS*.
- Brooks, T. F., Stuart, D., & Marcolini, M. A. (1989). *NASA Reference Publication 1218 Airfoil Self-Noise and Prediction*.
- Centrales Eólicas. (n.d.). Retrieved November 18, 2019, from <https://thales.cica.es/rd/Recursos/rd99/ed99-0226-01/capitulo4a.html#2>
- Conde Pabón, B. , F. S. E. , & S. R. J. (2020). (2020). *Simulación de un alabe de aerogenerador para bajas potencias y bajas velocidades*.
- Cortés, R. R. N. (n.d.). *Guía Práctica para el Análisis y la Gestión del Ruido Industrial*.
- Dincer, F. (2011). The analysis on wind energy electricity generation status, potential and policies in the world. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 15, Issue 9, pp. 5135–5142). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.042>
- Espejo Marín, C. (2004). La energía eólica en España. *Investigaciones Geográficas*, 35(35), 45–65. <https://doi.org/10.14198/ingeo2004.35.03>
- Farassat, F. (1981). Linear acoustic formulas for calculation of rotating blade noise. *AIAA Journal*, 19(9), 1122–1130. <https://doi.org/10.2514/3.60051>
- Fernández-Reyes, R. (2016). Rogelio Fernández-Reyes es miembro de los grupos de investigación de MDCS (Universidad Complutense de Madrid) y GREHCCO (Universidad de Sevilla). In N° (Vol. 132). http://sciencepolicy.colorado.edu/media_coverage
- Grilo Bensusan, Á. (2016). *Predicción y monitorizado de ruido de aerogeneradores y sus implicaciones para la evaluación acústica de parques eólicos*.
- Grosveld, F. W. (1985). Prediction of broadband noise from horizontal axis wind turbines. *Journal of Propulsion and Power*, 1(4), 292–299. <https://doi.org/10.2514/3.22796>
- Gustavo, P., & Navarro, R. (n.d.). *Modelos de turbulencia introductorio*.
- Henin, C. A., Iannace, G., & Maffei, L. (2010). *RUIDO DE GENERADORES EOLICOS ANALISIS Y APLICACION DE LA METODOLOGIA DE MEDICION SEGUN NORMATIVA VIGENTE Sound in Multisensory Perception and*

- Interaction View project Wind turbine noise perception View project.*
<https://www.researchgate.net/publication/236890138>
- Henin, C. A., Iannace, G., Maffei, L., Roggio, I. E., & Miretti, G. A. (2010). RUIDO DE GENERADORES EÓLICOS: ANÁLISIS Y APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE MEDICIÓN SEGÚN NORMATIVA VIGENTE. *2º Congreso Internacional de Acústica UNTREF.*
- hernandez2019ruido.* (n.d.).
- Hubbard, H. H., & Shepherd, K. P. (n.d.). *7 Wind Turbine Acoustics.*
- José, J., & Gutiérrez, S. (n.d.). *DESARROLLO DE LA ENERGÍA EÓLICA EN COLOMBIA.*
- lighthill1952.* (n.d.).
- Mueller, D. W., & Abu-Mulaweh, H. I. (2006). Prediction of the temperature in a fin cooled by natural convection and radiation. *Applied Thermal Engineering*, 26(14–15), 1662–1668.
<https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2005.11.014>
- Núñez, J. C. A. (2004). Diseño y construcción de un prototipo de generador eólico de eje vertical. *Universidad de Chile.*
- Oerlemans, S., Fisher, M., Maeder, T., & Kögler, K. (2009). Reduction of wind turbine noise using optimized airfoils and trailing-edge serrations. *AIAA Journal*, 47(6), 1470–1481. <https://doi.org/10.2514/1.38888>
- Presidente, J., Fernando José Parracho Lau Orientadores, D., Fernando José Parracho Lau Doutor João Manuel Gonçalves de Sousa Oliveira Vogais, D., & Pedro da Graça Tavares Alvares Serrão, D. (n.d.-a). *Wind Turbine Noise Prediction Engenharia Aeroespacial.*
- Presidente, J., Fernando José Parracho Lau Orientadores, D., Fernando José Parracho Lau Doutor João Manuel Gonçalves de Sousa Oliveira Vogais, D., & Pedro da Graça Tavares Alvares Serrão, D. (n.d.-b). *Wind Turbine Noise Prediction Engenharia Aeroespacial.*
- Revilla de Lozar, Javier.* (n.d.).
- Sahu, B. K. (2018). Wind energy developments and policies in China: A short review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 81, pp. 1393–1405). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.183>
- System Coupling User's Guide.* (2022). <http://www.ansys.com>
- TFG-I-890.* (n.d.).
- Viento Dinamarca.* (n.d.). Retrieved November 18, 2019, from <https://winddenmark.dk/>
- wagner2012wind.* (n.d.).
- Wiser, R., Bolinger, M., Hoen, B., Millstein, D., Rand, J., Barbose, G., Darghouth, N., Gorman, W., Jeong, S., Mills, A., & Paulos, B. (2021). *Land-Based Wind Market Report: 2021 Edition.* <http://www.osti.gov>
- Zhao, D., Han, N., Goh, E., Cater, J., & Reinecke, A. (2019). Aeroacoustics of wind turbines. In *Wind Turbines and Aerodynamics Energy Harvesters* (pp. 463–491). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-817135-6.00008-9>

9. ANEXOS

9.1 Mallas generadas

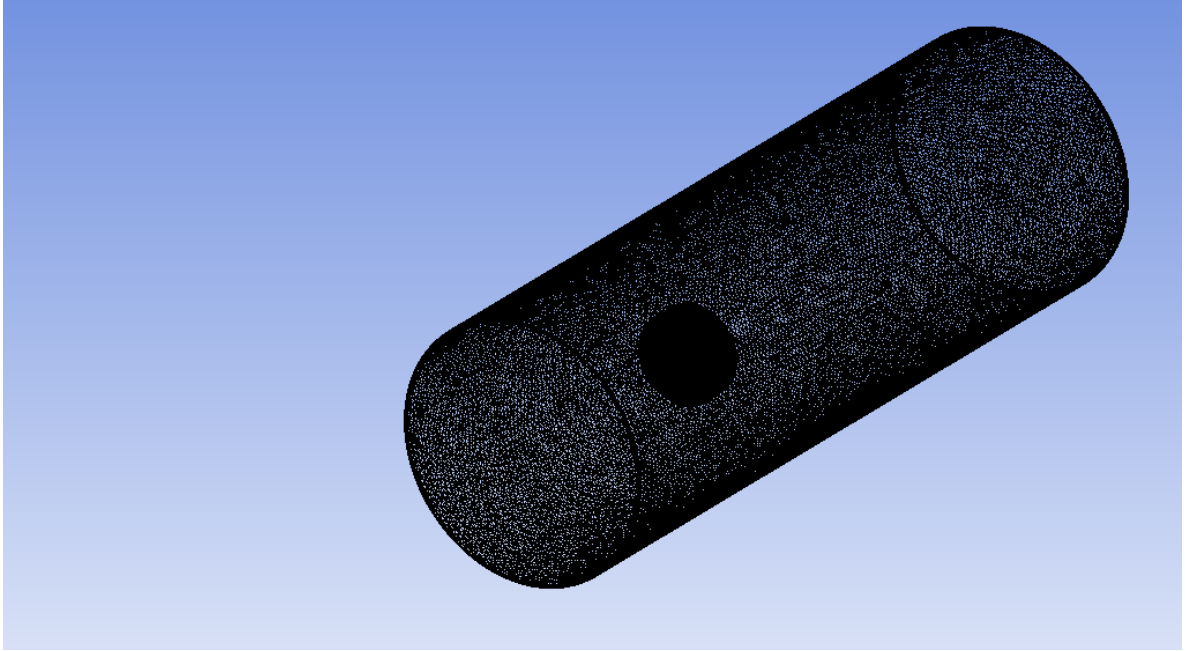


Figura 36: Malla completa rediseño 1

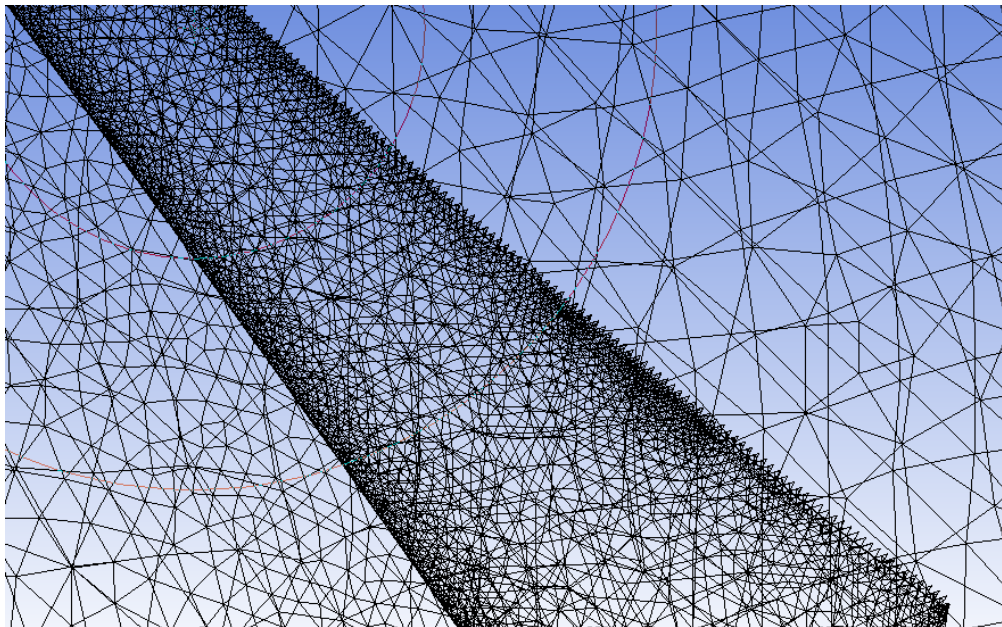


Figura 37: Zoom malla rediseño 1

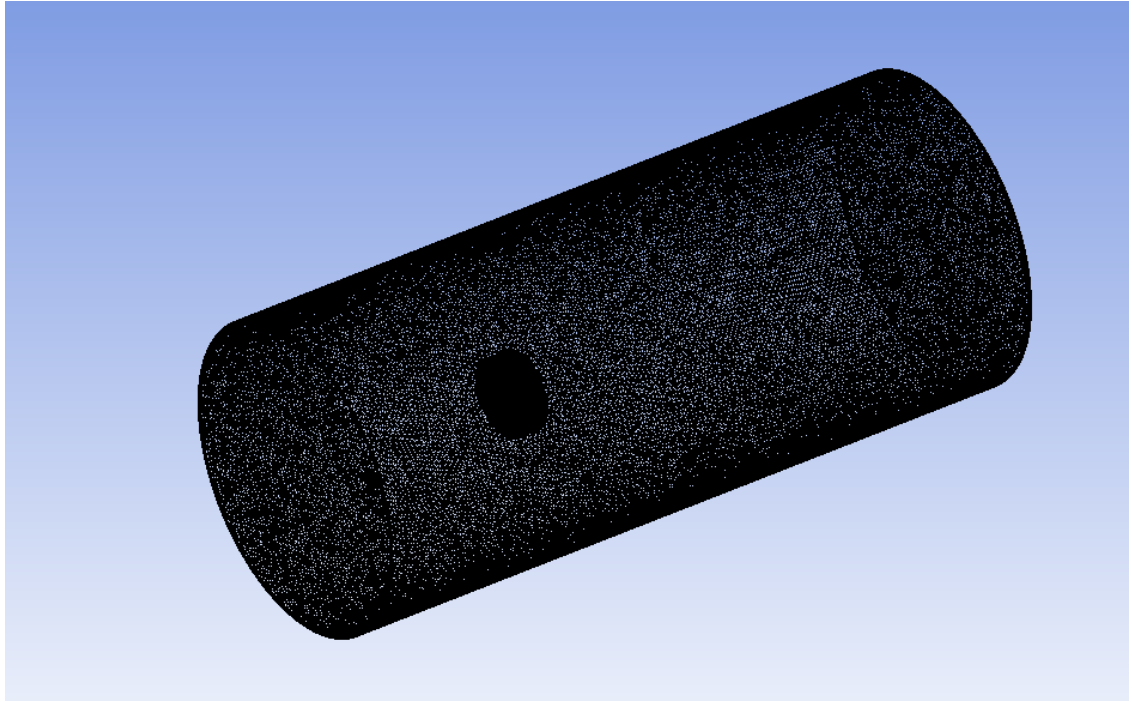


Figura 38: Malla completa rediseño 2

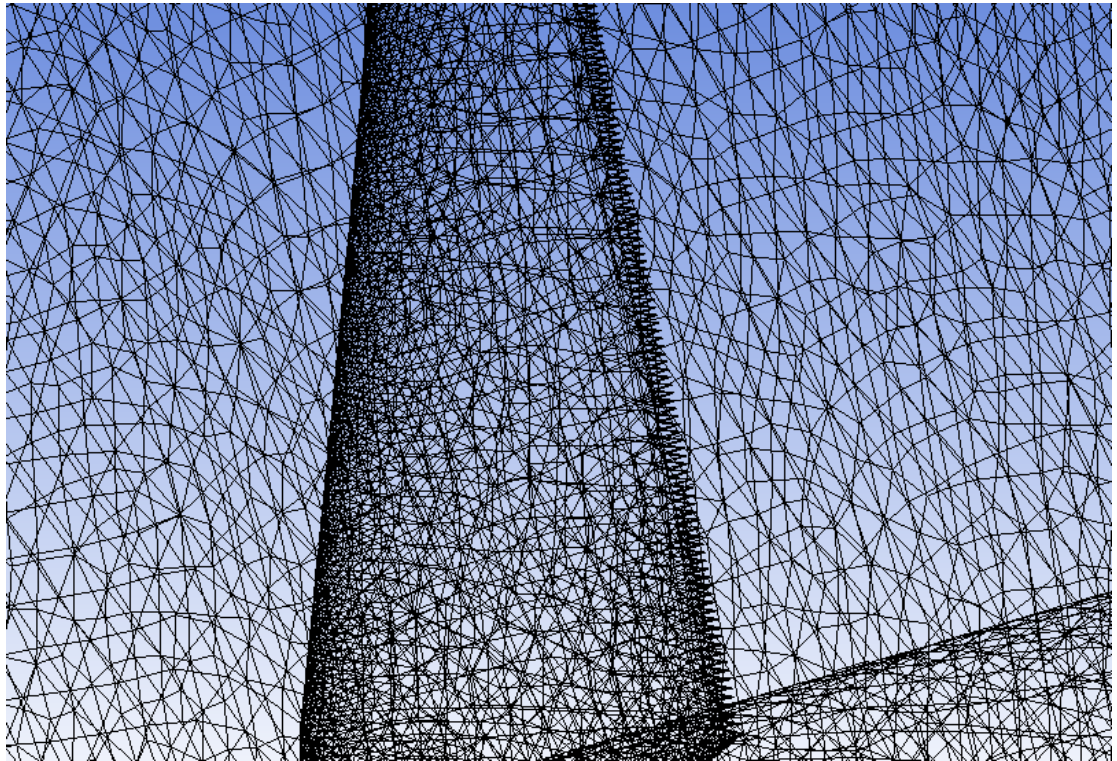


Figura 39: Zoom malla rediseño 2

En las *Fig 39*, *Fig 38*, *Fig 40* y la *Fig 41* se muestra la malla obtenida para cada uno de los rediseños las cuales fueron utilizadas para realizar las simulaciones respectivas.

9.2 Resultados simulación FW&H

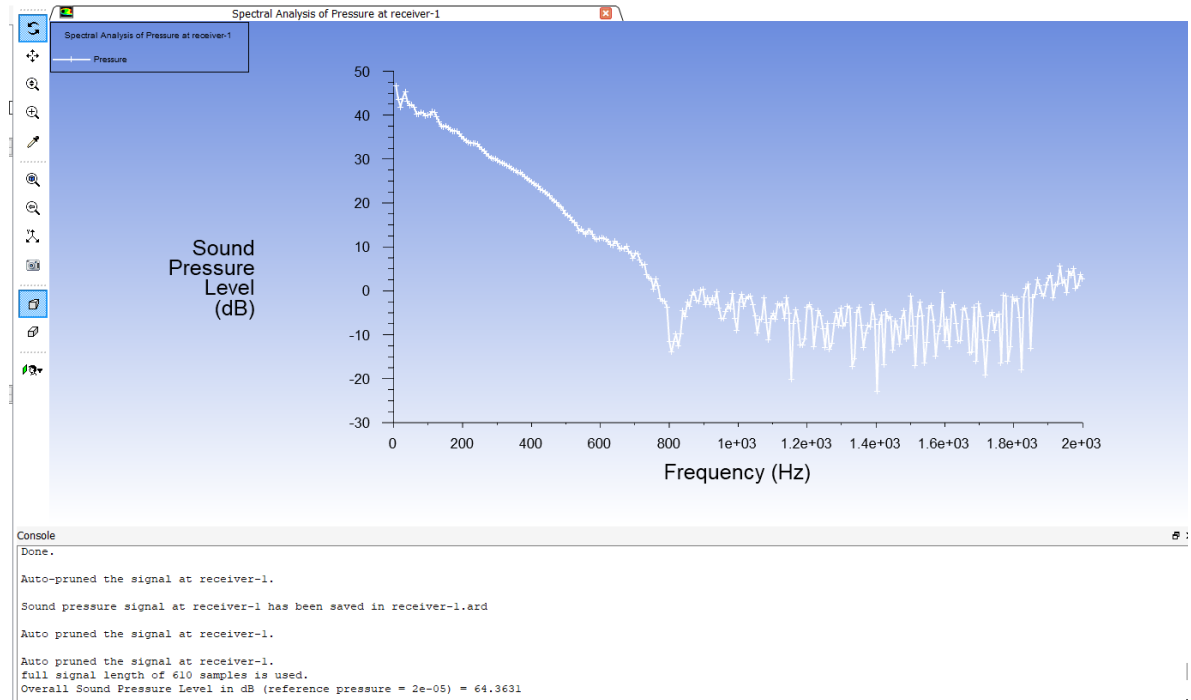


Figura 40: Espectro de presión sonora geometría referencia

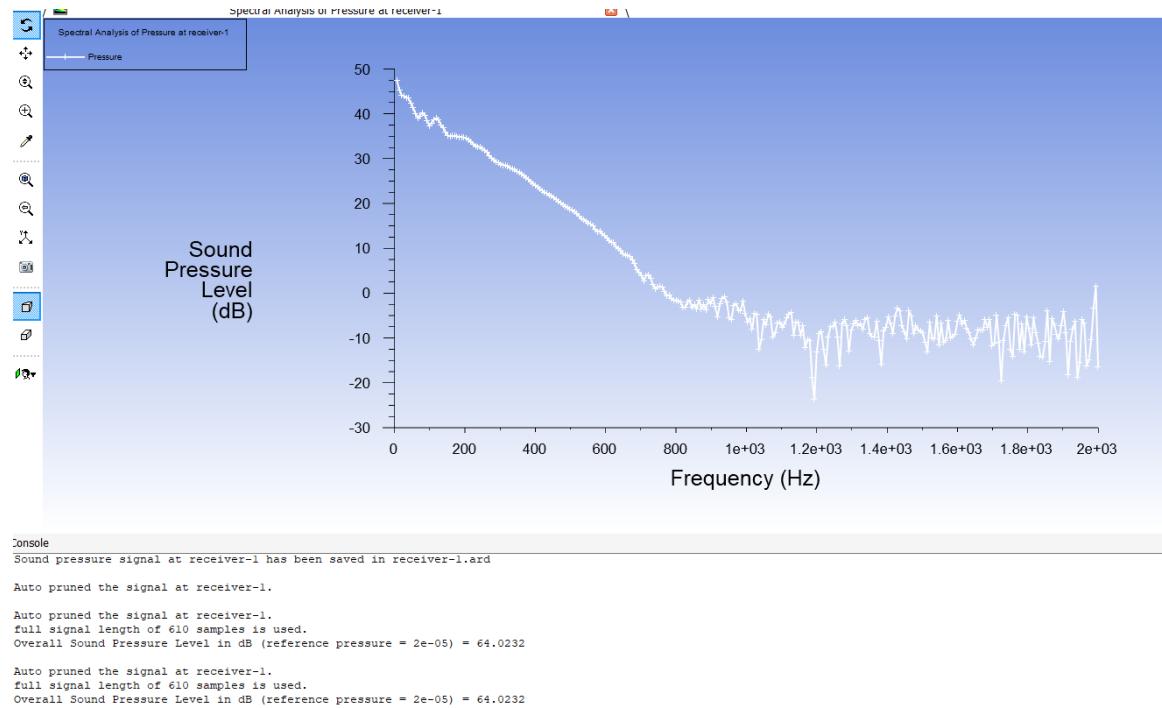


Figura 41: Espectro de presión sonora rediseño 1

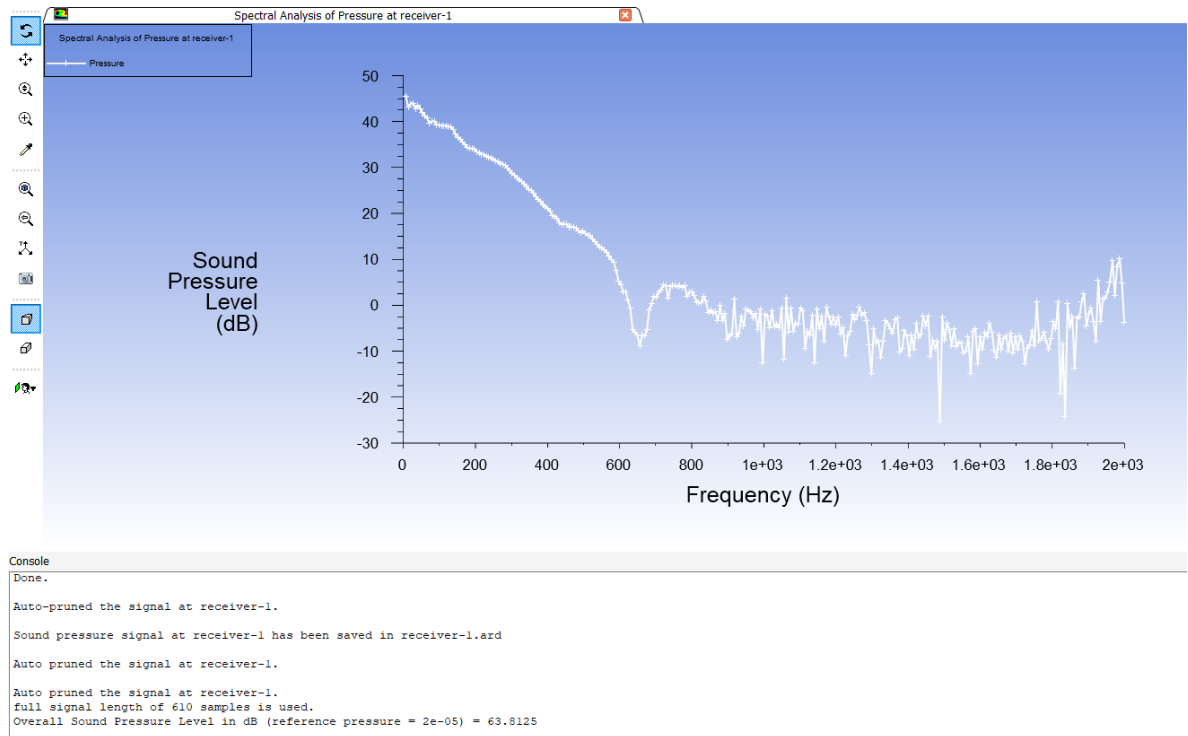


Figura 42: Espectro de presión sonora rediseño 2

Las Fig 42, Fig 43 y la Fig 44 se muestra la interface de ANSYS de las gráficas resultantes para cada simulación transitoria de los niveles de presión sonora en cada uno de los diseños realizados .

9.3 Obtención del torque

En las Fig 45, Fig 46 y la Fig 47 encontramos los valores de torque obtenidos para cada uno de los diseños realizados y el número de iteraciones realizada en ANSYS FLUENT para la obtención de dichos valores

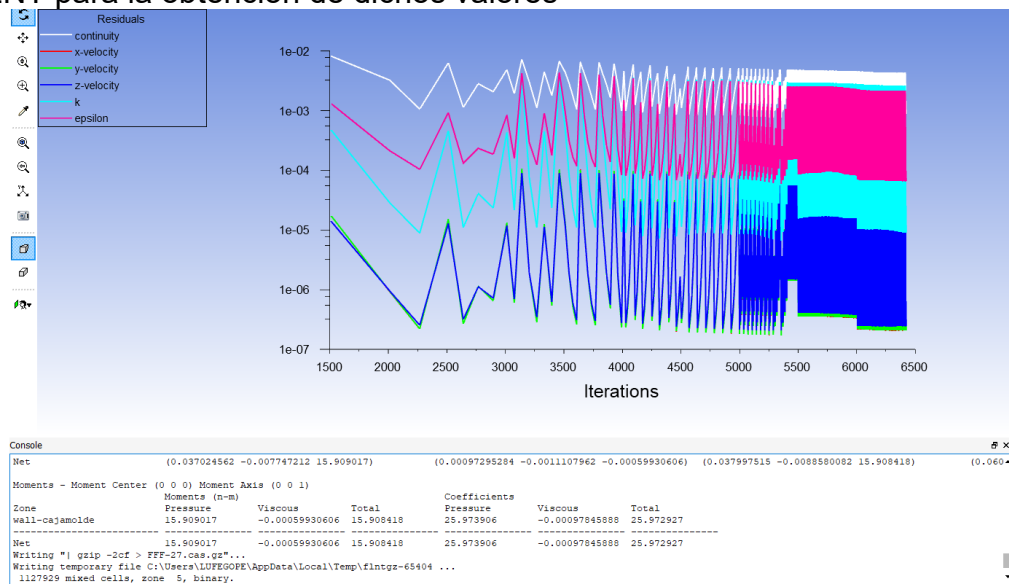


Figura 43: Torque geometría de referencia

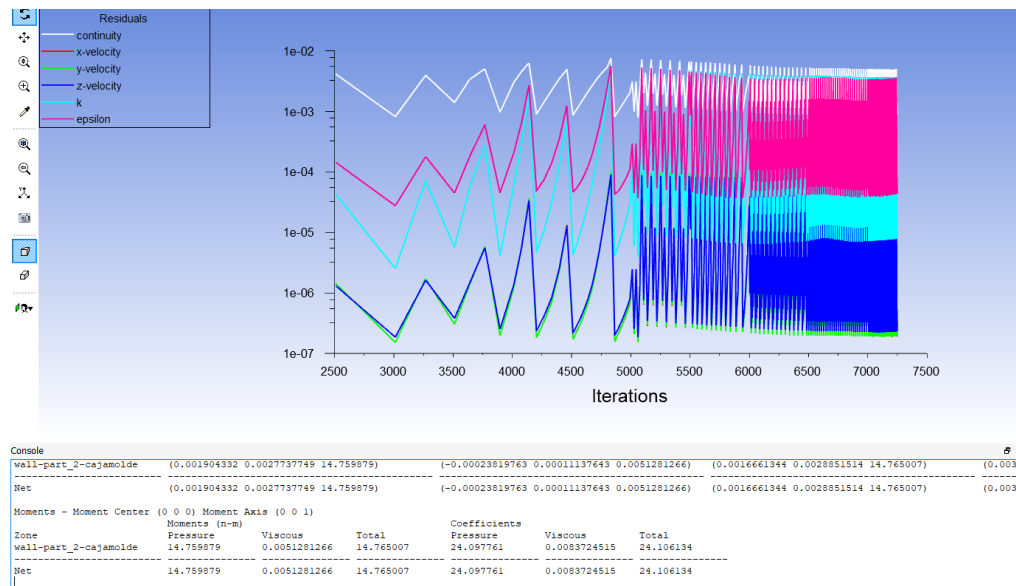


Figura 44:Torque rediseño 1

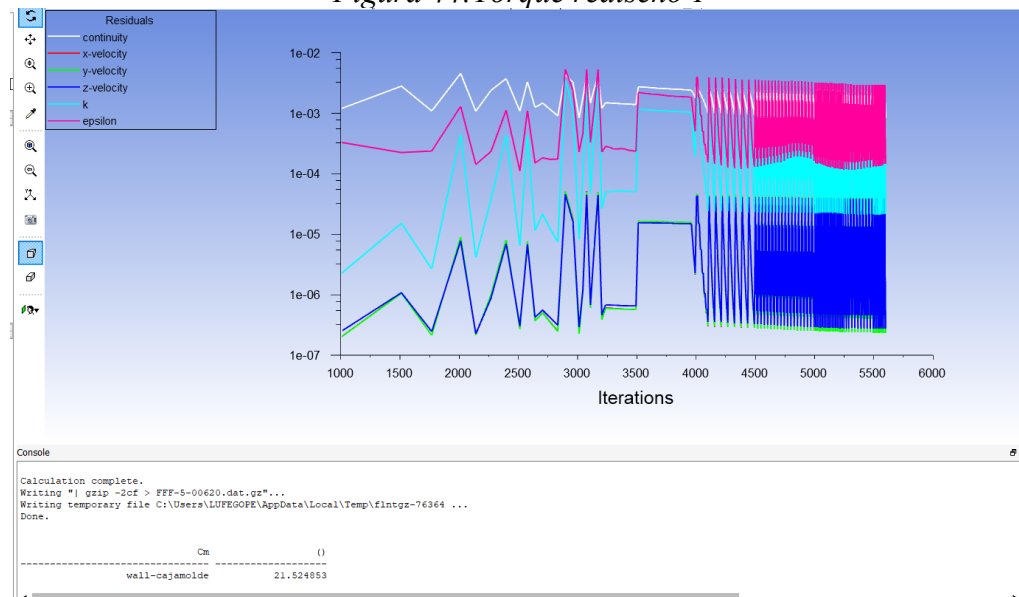


Figura 45:Torque rediseño 2