

UNIVERSIDAD DE LAS AMÉRICAS PUEBLA

Escuela de ingenierías.

Departamento de Computación, Electrónica y Mecatrónica.

UDLAP®

**Desarrollo de aerogenerador de eje vertical para espacios
urbanos con transductores piezoeléctricos.**

Tesis que, para completar los requisitos del Programa de Honores presenta el
estudiante

José Felipe Puelles Chávez

163350

Ingeniería Mecatrónica

Dr. Pedro Bañuelos Sánchez

San Andrés Cholula, Puebla.

Primavera 2023

Hoja de firmas

Tesis que, para completar los requisitos del Programa de Honores presenta el
estudiante **José Felipe Puelles Chávez**

Director de Tesis



Dr. Pedro Bañuelos Sánchez

Presidente de Tesis



Dr. José Luis Vázquez González

Secretario de Tesis



Dr. Rafael Carrera Espinoza

Agradecimientos

El presente trabajo de investigación recopila una serie de conocimientos tanto de investigación, como de práctica y experimentación que fueron posibles de condensar en una tesis gracias a una serie de oportunidades que me permitieron tener las herramientas necesarias.

Comenzando por mi familia, Jose Felipe Puelles Espina, Erica Chávez Venegas y Ane Iratxe Puelles Chávez, quienes inculcaron en mi creatividad y curiosidad, que me contagiaron del hambre por la excelencia y la autosuperación y me brindaron todos los medios necesarios afectivos, intelectuales, espirituales y materiales para llegar hoy, razón por la que estoy y estaré agradecido toda la vida.

La figura de los mecenas no es nueva, y su interés por las áreas del desarrollo humano ha permitido a mentes brillantes alcanzar su potencial y revolucionar el mundo de alguna forma; En este sentido tengo la fortuna de no haber contado con uno pero dos hombres que apoyaran mis estudios y a quienes estaré agradecido toda la vida y no solamente eso sí no que abrazaré su generosidad y me comprometo a replicar con futuras personas, gracias Francisco Álvarez Lazo e Íñigo Ocejo Rojo por su apoyo los últimos cinco años, me han dado una gran lección.

Finalmente, todo el acervo intelectual de este documento fue incitado, promovido y supervisado por un catedrático e investigador eminencia tanto en su área de conocimiento como dentro de la Universidad de las Américas Puebla, Gracias al profesor Pedro Bañuelos Sánchez por ser mi mentor, tutor y asesor durante el proceso del programa de honores y mi carrera en general, por darme la oportunidad de trabajar con él y toda la libertad y confianza para mí proyecto.

índice

| | |
|--|-----|
| Resumen/abstract | 1 |
| 1.-Introducción | 2 |
| 1.1.-Objetivos | 5 |
| 1.1.1.-Generares | 5 |
| 1.1.2.-Específicos | 5 |
| 1.2.-Hipótesis | 5 |
| 2.-Justificación | 6 |
| 2.1.-Cambio climático y energía renovable | 6 |
| 2.2.-Internet de las cosas y energy harvesting | 14 |
| 3.-Antecedentes | 17 |
| 3.1.-Energía eólica | 17 |
| 3.2.-Piezoeléctricos | 24 |
| 4.-Marco teórico | 28 |
| 4.1.-Aerogeneradores | 28 |
| 4.2.-Piezoeléctricos | 48 |
| 5.-Metodología | 75 |
| 5.1.-Planeación | 75 |
| 5.2.-Planteamiento | 75 |
| 5.3.-Diseño | 82 |
| 5.4.-Simulación | 86 |
| 5.5.-Modelo | 91 |
| 6.-Resultados y discusión | 93 |
| 6.1.-Simulación | 93 |
| 6.2-Modelado | 98 |
| 7.-Conclusiones y recomendaciones | 101 |
| Bibliografía | 104 |

Lista de figuras

| | |
|---|----|
| 2.1.1. CO2 concentración atmosférica últimos ochocientos mil años | 7 |
| 2.1.2. CO2 concentración últimos dos siglos | 8 |
| 2.1.3. Aumento de la temperatura global últimos 140 años | 8 |
| 2.1.4. Aumento del consumo mundial energético por región | 9 |
| 2.1.5. Porcentaje de energía renovable producida por año | 11 |
| 2.1.6. Porcentaje de fuentes de energía global 2019 | 11 |
| 2.1.7. Electricidad generada por fuentes eólicas anual | 12 |

| | |
|--|----|
| 2.1.8. Instalaciones eólicas anuales proyectadas y requeridas | 13 |
| 2.1.9. Proyecciones nuevas instalaciones eólicas mundiales | 14 |
| 2.2.1. Proyección dispositivos conectados a internet próxima década | 15 |
| 3.1.1. Ilustración egipcia embarcación con velas | 17 |
| 3.1.2. Ilustración molino generador eléctrico de Charles Brush | 19 |
| 3.1.3. Ilustración molino generador eléctrico de Poul la Cour | 20 |
| 3.1.4. Kratostate creado por Poul la Cour | 20 |
| 3.1.5. Turbina eólica comercial años 30's y 40's | 22 |
| 3.1.6. Turbina Johannes Juul 1956 | 23 |
| 3.2.1. Prensa mecánica para medición de fenómeno piezoeléctrico en cuarzo | 25 |
| 4.1.1. Flujo laminar y turbulento | 31 |
| 4.1.2. Principio de sustentación | 33 |
| 4.1.3. Tubo de Bernoulli | 34 |
| 4.1.4. Tubo de Venturi | 35 |
| 4.1.5. Efecto Bernoulli de sustentación aerodinámica | 35 |
| 4.1.6. Tercera ley de Newton en la sustentación aerodinámica | 36 |
| 4.1.7. Partes de un perfil alar | 36 |
| 4.1.8. Cuerda de un perfil alar | 37 |
| 4.1.9. Sustentación y arrastre respecto al ángulo de ataque | 38 |
| 4.1.10. Flujo laminar y turbulento sobre un perfil alar | 38 |
| 4.1.11. Velocidades y fuerzas en una pala de turbina | 39 |
| 4.1.12. Rosa de los vientos de frecuencia y velocidad media del viento | 41 |
| 4.1.13. Perfil de velocidad de viento conforme altura y superficie, ley exponencial de Hellmann | 43 |
| 4.1.14. Capa límite de viento | 44 |
| 4.1.15. Flujo de aire a través de un aerogenerador | 45 |
| 4.1.16. sección del flujo, velocidad y presión con masa constante | 45 |
| 4.1.17. Coeficiente de potencia en función de la velocidad para distintos tipos de aerogeneradores | 46 |
| 4.1.18. Componentes electromecánicos de una turbina eólica | 47 |

| | |
|--|----|
| 4.2.1. Transductores eléctricos y electrónicos comparación | 48 |
| 4.2.2. Transductores electrónicos sensores y actuadores | 49 |
| 4.2.3. Orden de transductores según su propiedad de funcionamiento | 49 |
| 4.2.4. Categorías de transductores electrónicos | 51 |
| 4.2.5. Fenómeno transductor piezoeléctrico bidireccional | 52 |
| 4.2.6. Esfuerzos en mecánica de sólidos | 53 |
| 4.2.7. Comportamiento de piezoeléctricos a tensión, compresión o dependiendo la polaridad del voltaje aplicado | 55 |
| 4.2.8. Redes de Bravis | 57 |
| 4.2.9. Celda unitaria y medidas longitudinales y angulares | 57 |
| 4.2.10. Relación arista-radio atómico | 58 |
| 4.2.11. número de átomos dentro de una celda según localización | 58 |
| 4.2.12. Número de coordinación | 59 |
| 4.2.13. Impurezas y defectos de la estructura cristalina | 60 |
| 4.2.14. Dislocaciones de los cristales | 61 |
| 4.2.15. Constitución de los arreglos monocristalinos, policristalinos y amorfos | 61 |
| 4.2.16. Perspectiva microscópica del efecto piezoeléctrico | 62 |
| 4.2.17. Solido con efecto piezoeléctrico suma de dipolos | 63 |
| 4.2.18. Perovskita de PZT y su deformación atómica | 63 |
| 4.2.19. Fabricación de piezoeléctricos sintéticos | 64 |
| 4.2.20. Numeración de los ejes según sentido de la tensión y orientación del desplazamiento eléctrico | 69 |
| 4.2.21. Circuito equivalente 1 | 70 |
| 4.2.22. Reducción del circuito equivalente 1 | 70 |
| 4.2.23. Circuito equivalente 2 | 71 |
| 4.2.24. Circuito equivalente 3 | 72 |
| 4.2.25. Circuito equivalente 4 | 72 |
| 4.2.26. Circuito equivalente 5 | 73 |
| 4.2.27. Configuración en cantiléver | 73 |
| 4.2.28. Configuración en címbalo | 74 |
| 4.2.29. Configuración de pila | 74 |
| 5.1.1. Proceso de desarrollo del proyecto | 75 |
| 5.2.1. Modelo cinemático de torre con masa despreciable | 79 |
| 5.2.2. Modelo del mecanismo propuesto | 80 |
| 5.2.3. Sistema modelado en 3D | 80 |
| 5.2.4. Mecanismo modelado en 3D | 81 |
| 5.3.1. Piezoeléctrico utilizado | 82 |

| | |
|---|-----|
| 5.3.2. Modelos para simulación de aerodinámica | 83 |
| 5.3.3. Simulación de presiones Mercedes G | 84 |
| 5.3.4. Simulación de presiones tesla cybertruck | 84 |
| 5.3.5. Simulación de presiones Datsun | 84 |
| 5.5.1. Modelo uno, <i>SolidWorks</i> perspectiva completa | 92 |
| 5.5.2. Modelo uno, <i>SolidWorks</i> perspectiva sección | 92 |
| 5.5.3. Modelo dos, <i>SolidWorks</i> perspectiva completa | 93 |
| 5.5.4. Modelo uno, <i>SolidWorks</i> perspectiva sección | 93 |
| 6.1.1. Gráfica de masa en función de la longitud del poste | 95 |
| 6.1.2. Gráfica de masa en función de la longitud del poste | 96 |
| 6.2.1. Prototipo modelo 3D, perspectiva | 99 |
| 6.2.2. Prototipo modelo 3D, frente | 99 |
| 6.2.3. Prototipo 3D, lateral | 100 |
| 6.2.4. Mediciones de osciloscopio en prototipo a escala con ocho piezoeléctricos conectados en paralelo y accionado por un soplido humano | 101 |

Tablas

| | |
|--|----|
| 4.1.1. Coeficientes alfa para ley exponencial de Hellmann | 42 |
| 4.2.1. Materiales inteligentes | 52 |
| 4.2.2. Constantes piezoeléctricas | 69 |
| 5.2.1. Estándares para determinar distancia entre automóviles | 76 |
| 5.2.3. Medidas promedio alto de un automóvil particular | 77 |
| 5.2.4. Medidas promedio ancho de un automóvil particular | 77 |
| 5.2.5. Medidas promedio largo de un automóvil particular | 77 |
| 5.4.1. Ficha técnica modelo cero centímetros | 88 |
| 5.4.2. Ficha técnica modelo cinco centímetros | 88 |
| 5.4.3. Ficha técnica modelo diez centímetros | 89 |
| 5.4.4. Ficha técnica modelo 15 centímetros | 89 |
| 5.4.5. Ficha técnica modelo veinte centímetros | 89 |
| 5.4.6. Ficha técnica modelo veinticinco centímetros | 90 |
| 5.4.7. Ficha técnica modelo treinta centímetros | 90 |
| 5.4.8. Ficha técnica modelo treinta y cinco centímetros | 90 |
| 5.4.9. Ficha técnica modelo cuarenta centímetros | 91 |
| 6.1.1. Longitud de poste, masa y frecuencia de los modelos creados | 94 |
| 6.1.2. Ficha técnica modelo cinco centímetros | 97 |
| 6.1.3. Ficha técnica modelo veintitrés centímetros | 97 |
| 6.1.4. Ficha técnica modelo treinta y ocho centímetros | 98 |

Definiciones

Energy harvesting: nombre que recibe la captación de energía del entorno para producir electricidad.

Internet de las cosas: red de objetos físicos de uso cotidiano que integran electrónica para sensor y actuar conforme a una interacción con otros sistemas a través de internet.

Energía exótica: referencia a fuentes de energía no convencionales en la producción de electricidad.

Electrotérmicos: fenómeno de transformación de energía de calorífica a eléctrica o viceversa.

Fotovoltaico: fenómeno que produce una fuerza eléctrica producto de la radiación lumínica.

Transductor: Dispositivo de electrónica que transforma energía de un tipo a otro, generalmente tienen como entrada o salida la energía eléctrica por ser de aplicación electrónica.

Piezoeléctrico: objeto con la capacidad de polarizarse eléctricamente al someterse a un esfuerzo o viceversa.

Aerodinámica: es el estudio científico de los objetos rígidos y su interacción con el aire.

Mecánica de sólidos: estudio del movimiento que tienen objetos compuestos de manera que se restringen del movimiento entre ellos.

Estática de cuerpos rígidos: estudio de la mecánica que analiza el efecto de los esfuerzos dentro de un sólido y su estructura interna.

dinámica de cuerpos rígidos: estudio de interacciones entre piezas solidas que intervienen unas con otras durante la aplicación de fuerzas ajenas al sistema.

Frecuencia resonante: termino que se le otorga a la frecuencia de movimiento de un objeto que le permitirá llegar a la máxima oscilación producto de la alineación entre la fuerza aplicada y la respuesta interna.

Partes por millón: unidad de medida para la concentración de acuerdo con las unidades que hay en un millar como conjunto.

Megatoneladas equivalentes a petróleo: unidad de medida energética que se compara a con un equivalente de la energía liberada por la combustión de esta masa de petróleo.

Hidrólisis: reacción química que separa la molécula de agua en sus componentes fundamentales (hidrógeno y oxígeno).

Sustentación: Fuerza que sufre un cuerpo al tener interacción con un fluido.

Flujo laminar: movimiento ordenado de las capas de un fluido formadas por sus partículas fundamentales.

Ángulo de ataque: ángulo formado entre una línea de referencia de un cuerpo respecto a la dirección de movimiento contra un fluido.

Turbulencia: movimiento desordenado de las capas de un fluido formadas por sus moléculas fundamentales.

Análisis tensorial: matemática de cálculo para operar componentes algebraicos como escalares, vectores y matrices sin dependencia a coordenadas.

Titanato de bario: ferroeléctrico cerámico con efectos piezoeléctricos.

Circonato de plomo: ferroeléctrico con efectos piezoeléctricos.

Cristal Perovskite: Estructura cristalina originalmente descubierta un mineral ruso pero encontrado en múltiples materiales.

Resistividad: reacción de un material para impedir el flujo eléctrico a través de él.

Capacitancia: capacidad de un dispositivo para almacenar voltaje aprovechando un campo eléctrico.

Inductancia: capacidad de un dispositivo para almacenar corriente aprovechando un campo magnético.

Covalente: enlace entre dos átomos que comparten electrones y son no metálicos.

Iónico: enlace entre dos átomos que se atraen por tener cargas eléctricas opuestas consecuencia de la pérdida y ganancia de electrones de estas partículas.

Metálico: enlace compacto de átomos que comparten sus electrones a manera de nube o mar dando lugar a estructuras muy unidas.

Ion-dipolo: fuerza que une partículas con cargas eléctricas que se atraen o se repelen entre ellas, en este caso un ion con una carga dada la falta o sobra de electrones y un dipolo que se encuentra desbalanceada en cargas eléctricas por la distribución de su geometría.

Van der Waals (por dipolo-dipolo, dipolo inducido y fuerzas de dispersión de London): fuerzas entre moléculas consecuencia de las cargas eléctricas que forman estructuras no tan fuertes como las uniones atómicas.

Puente de hidrógeno: atracción entre las moléculas de agua producto de la polarización de estas.

Dipolos: conjunto de dos cargas eléctricas contrarias en carga e iguales en magnitud.

Ley de Hooke: relación entre fuerza y deformación de un material dentro de un parámetro reversible.

Abstract

This thesis develops a deep context about the importance of energy for living beings, particularly humans, as well as the urgent need for the development of clean technologies, given the current climate challenge and then presents a thorough investigation of wind energy and piezoelectric technology from its history to its basic concepts and the science that explains and models its operation. The focus on creating an intersection between the above concepts and create a process for the design of a vertical axis wind turbine specifically designed for urban environments that operates from the piezoelectric effect in the most optimal way possible is the objective of the document. Finally, the project demonstrates how the proposed design process not only yields a result but also offers a high degree of versatility and ends up yielding more than one theoretically functional result.

Resumen

La presente tesis desarrolla un estudio profundo sobre la importancia de la energía para los seres vivos, en particular el humano, además de la urgente necesidad del desarrollo de tecnologías limpias dado el reto climático actual. Esto con el propósito de, posteriormente, presentar una investigación profunda sobre la energía eólica y la tecnología piezoeléctrica desde su historia hasta sus conceptos básicos; como también la ciencia que explica y modela su funcionamiento.

Centrarse en crear una intersección entre los conceptos antes mencionados y crear un proceso para el diseño de un aerogenerador de eje vertical específicamente diseñado para entornos urbanos que opere a partir del efecto piezoeléctrico de la manera óptima posible será el objetivo de este documento. Finalmente, el proyecto demuestra cómo el proceso de diseño propuesto no solamente permite obtener un resultado, si no que ofrece un alto grado de versatilidad y termina arrojando más de un resultado teóricamente funcional.

Capítulo 1: Introducción

Para más de un pensador el aprovechamiento de la energía del entorno de los seres, en particular de los inteligentes como el ser humano, determina tanto su poder como la evolución de la especie. Yuval Noah Harari (2011), historiador contemporáneo, afirma en su libro *Sapiens* que el papel que tuvo el fuego para las especies de humano antiguo fue determinante al ser este el motor de transformación para alimentos, reduciendo el gasto energético de la digestión y permitiendo el crecimiento del cerebro, y también por haber sido herramienta de transformación/protección que permitió la manipulación de materias brutas. Por otro lado, el geógrafo, biólogo y evolucionista Jared Diamond (1997) en *Armas, gérmenes y acero* describe como factor fundamental del éxito de las sociedades euroasiáticas en su desarrollo, evolución y expansión el acceso a animales domésticos usados en los procesos de producción no solo como materia, sino, también, como potencia de movimiento. Finalmente llegando a Nikolái Kardashov (1964), astrofísico del siglo XX, él desarrolló una escala para medir el desarrollo de toda especie inteligente basado en su capacidad para aprovechar la energía presente en su entorno: desde tipo uno, que utiliza toda la presente en su planeta; tipo dos, que explota la proveniente de la estrella de su sistema solar; y terminando en tipo tres, que extrae toda la existente en una galaxia.

Todos estos ejemplos de la trascendencia de la energía en el desarrollo y realización de una civilización, que desde su origen del griego infiere «fuerza de acción o de trabajo», y que en física se entiende como la capacidad de realizar trabajo, mientras que en economía se trata como un recurso de particular importancia en todas sus fases (extracción, transformación, distribución, etc.), permitiendo poner en perspectiva lo interesante e importante del estudio relacionado a este motor de la humanidad.

La tesis se enfoca en alternativas de energías renovables al actual paradigma de producción, basado en combustibles fósiles, dadas las consecuencias negativas

que estas conllevan y que deberían tener una tendencia a desaparecer a mediano plazo. Particularmente se desarrollará un modelo de *energy harvesting* o cosechamiento de energía por su traducción al español, esta disciplina tiene el objetivo de producir energía eléctrica de baja potencia para alimentar dispositivos de bajo consumo instalados en ubicaciones remotas para redes eléctricas, del cual su uso se encuentra en creciente popularidad dado el desarrollo de tecnología IoT (Internet de las Cosas), y su necesidad de alimentación eléctrica limitada por la infraestructura disponible en el espacio que, para lugares no acondicionados para ello implica costosas y complejas remodelaciones, justificando el uso de generadores alternos individuales.

Existen múltiples estrategias de *energy harvesting*. Generalmente relacionadas con fuentes de energía exótica y, comúnmente, resultado de un desperdicio de energía como producto de otro proceso: desde térmicos y electrotérmicos por transmisión de calor; mecánicos basados en vibraciones e impactos aprovechando el proceso fotovoltaico en una celda solar; o, incluso, antenas que transformen señales de radio en electricidad. Todos estos con el reto de determinar la mejor de las fuentes de energía encontrada en el entorno de la aplicación, encontrar un transductor (transformador de un tipo de energía a otro) apropiado para la tarea, diseñar un sistema apropiado que embone con el componente a alimentar y que armonice con el entorno, además de complementar con un post procesado de energía que permita su estabilización, almacenamiento y consumo.

También es importante mencionar que, pese al amplio desarrollo de esta tecnología en las últimas décadas, aun es muy nueva y, por lo tanto, limitada en sus capacidades. Resultando en bajas potencias extraídas (razón por la que es aplicable al internet de las cosas, considerando que estos sistemas tienen un bajo consumo eléctrico). Esta afirmación sobre su rendimiento, entendiéndose tanto un reto como una oportunidad de crecimiento, en un área con mucha importancia para aplicaciones vanguardistas y que aumentará exponencialmente en el futuro el desarrollo de nuevos sistemas con materiales transductores con mejor rendimiento y procesos de tratado,

almacenamiento y administración más eficientes, serán trascendentes para la industria eléctrica en micro y, tal vez, en macro escala de producción.

El diseño presentado utiliza el fenómeno piezoeléctrico, propiedad de los materiales que, dado a su distribución molecular, permite transformar vibración e impactos en electricidad y viceversa. Estos materiales son comúnmente usados en electrónica industrial como sensores y actuadores para medir masa y fuerza o generar movimiento y sonido. El ejemplo más cercano es la bocina y micrófono del celular.

Este modelo será propulsado por energía eólica como producto del flujo vehicular en avenidas de alta velocidad. Ya que representan una gran pérdida de energía durante el transporte en el entendido de que la relación entre la velocidad del auto y la potencia necesaria para propulsar el mismo es cúbica dado a la resistencia del aire.

Para el desarrollo del modelo se indagará sobre aerodinámica y conceptos de energía eólica que implican: modelados matemáticos y computacionales de aerodinámica y mecánica de sólidos, física y química de los transductores piezoeléctricos para entender sus propiedades electromecánicas y su composición atómica-molecular, aerodinámica automotriz, entre otros conceptos generales de automoción, estática y dinámica de cuerpos rígidos y fenómenos de frecuencia resonante en estructuras y electrónica para el procesado de picos de potencia y su almacenamiento. Posteriormente, se planteará un prototipo a escala que compruebe el funcionamiento del modelo propuesto (mecánica y eléctricamente hablando) que avale el desarrollo del resto del proceso de diseño y que implique las fórmulas necesarias para crear un sistema similar ajustado a cada aplicación posible desde: el tipo de vehículos, la velocidad de las avenidas, los materiales usados para el modelo, el tipo de transductores e incluso el postproceso de la energía obtenida.

Para el diseño se utilizarán programas de dibujo computarizado, simulación de mecánica de sólidos y aerodinámica que justifiquen el funcionamiento haciendo un análisis de resultados y las iteraciones necesarias en el modelo. Además, el prototipo

será impreso a escala con tecnología aditiva de impresión 3D que haga una comprobación del correcto funcionamiento propuesto en un entorno físico controlado.

1.1.-Objetivos

1.1.1.-Generales

Identificar una aplicación viable para los piezoeléctricos en el campo de los aerogeneradores para desarrollar un modelo funcional, optimizado y ajustable a cada implementación planteada.

1.1.2.-Específicos

- Investigar historiografía sobre la energía eólica.
- Investigar historiografía sobre los piezoeléctricos.
- Determinar conceptos teóricos del diseño de aerogeneradores convencionales.
- Determinar conceptos teóricos del funcionamiento de los piezoeléctricos.
- Puntualizar conocimientos de mecánica de sólidos.
- Puntualizar conocimientos de vibraciones y frecuencias.
- Describir el funcionamiento de las herramientas de diseño mecánico digitales (SolidWorks).
- Describir el funcionamiento de las herramientas de simulación multi física digitales (Discovery Ansys).
- Proponer un modelo matemático para el diseño de un aerogenerador de vibración.
- Manufacturar un prototipo con características mínimas viables.
- Probar el prototipo fabricado y determinar iteraciones necesarias.

1.2.-Hipótesis

La tecnología piezoeléctrica puede ser aplicada en proyectos de energía renovable con una potencia producida considerable. Por lo que se presenta como una

alternativa en aplicaciones urbanas que, incluso, prioriza a la seguridad y el bajo mantenimiento por su ausencia de movimiento.

Capítulo 2: Justificación

En la introducción se mencionó a grandes rasgos las razones por las que la energía limpia y el *energy harvesting* serán de amplio interés para la industria durante las décadas siguientes por su relación con el internet de las cosas. A raíz de ello, en este capítulo se profundizará sobre las razones y el contexto económico, ambiental, tecnológico, industrial, político y social que promueven el uso de estas tecnologías.

2.1.-Cambio climático y energía renovable

Comenzando por la razón más preocupante por la cual la tecnología verde es de fundamental importancia para la humanidad y una de las armas en contra del mayor reto al que la humanidad se haya enfrentado, el cambio climático.

La idea del ser humano afectando el ecosistema en el que vive no es nueva, más de un autor señala al homo sapiens como causa de la extinción de la megafauna de Eurasia, Oceanía y América (Harari, 2011) y, estudios recientes de la universidad de Londres publicados en la revista *Science* (2021) explican el descubrimiento de pruebas de caídas en la temperatura mundial como producto de la caída demográfica en América durante la conquista europea. De todos los casos posibles a citar, ninguno es tan claro como el del calentamiento global que es producto de la revolución industrial.

Desde mitades del siglo XVIII y hasta principios del XIX la aparición de la máquina de vapor aplicada a procesos productivos y de transporte en Reino Unido, y posteriormente Europa y Norte América, transformó los hábitos de consumo y cambió para siempre la economía mundial. A partir de estos avances tecnológicos, teniendo como motor la energía calorífica producto de la combustión de fósiles, el carbón, el petróleo y el gas (aproximadamente aparecidos en ese orden) han sido la fuente de energía predominante, propagando su efecto colateral y la contaminación atmosférica. Los gases de efecto invernadero, como el monóxido y dióxido de carbono, se encargan

de retener la luz solar en la atmosfera aumentando la temperatura total del planeta, siendo el segundo mencionado el más común y mayor responsable.

De acuerdo con datos de la Agencia Espacial Norte Americana (NASA) en su división climática (2008-2010), los niveles de CO₂ (dióxido de carbono) presentes en la atmósfera marcan in hito histórico desde 1950 que se supera año con año (figura 2.1.1) basado en muestras atmosféricas extraídas de hielos en glaciares.



Figura 2.1.1. CO₂ concentración atmosférica últimos ochocientos mil años (NASA, 2010).

Por otro lado, los datos de la *European Environment Agency* (2019) corroboran estos números a partir de un análisis de los últimos dos siglos desde la primera revolución industrial donde se puede identificar una tendencia creciente y exponencial en la cantidad de bióxido de carbono, llegando a casi el doble de las partes por millón presentes al comienzo de 1800 (figura 2.1.2).

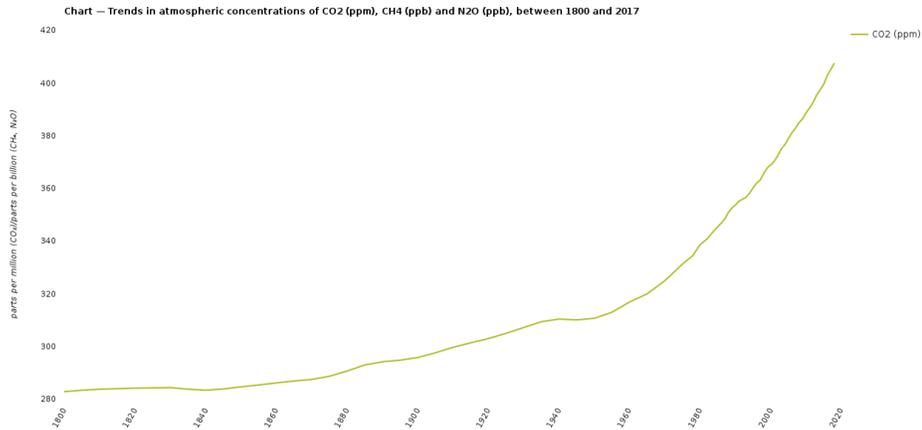


Figura 2.1.2. CO₂ concentración últimos dos siglos (EEA, 2019).

Con estos datos es razonable analizar el aumento de la temperatura global durante los últimos ciento cuarenta años confirmados por múltiples agencias como presenta la figura 2.1.3. De los cuales la National Aeronautic and Space Administration (NASA), el National Center for Environmental Information (NOAA) Berkeley Earth y el Hadley Center Climatic Research Unit coinciden en que se ha presentado un rápido aumento en las temperaturas promedio globales, aproximadamente un grado centígrado y con tendencia a superar el grado centígrado a comparación del estándar preindustrial y medio en las próximas décadas (NASA, 2023).

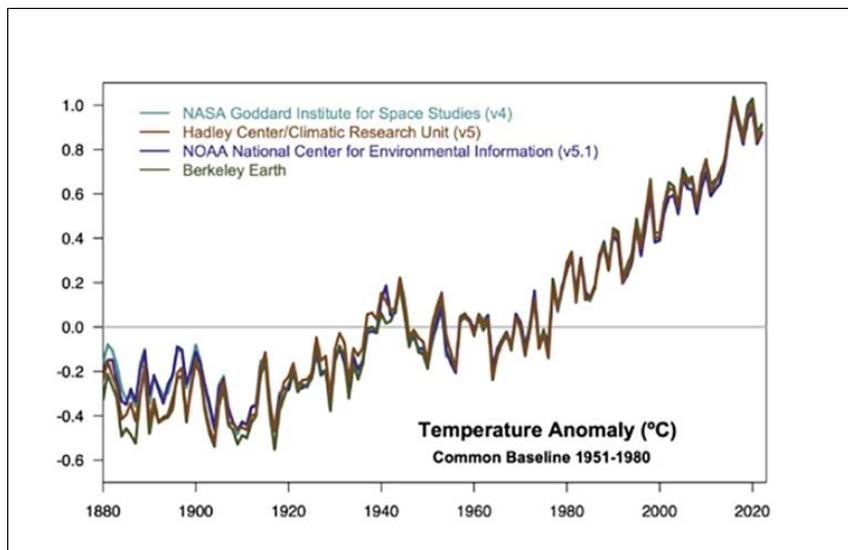


Figure 2.1.3. Aumento de la temperatura global últimos 140 años (NASA, 2022).

Este calentamiento promedio tiene un efecto destructivo en todos los ecosistemas del planeta: desde el derretimiento de polos y aumento en el nivel del mar, sequías e inundaciones, hasta el aumento de incendios en zonas forestales, tormentas y otros desastres naturales. Según la Organización de las Naciones Unidas, durante la última década el ritmo de extinción de especies aumentó mil veces en comparación al natural, la industria agraria se vio afectada para aquellos grupos menos favorecidos y de media anual se registraron más de veintitrés millones de personas desplazadas como consecuencia de estos fenómenos (ONU, s.f.).

Mientras tanto, la tasa de consumo total de energía en el mundo ha aumentado como producto del crecimiento demográfico y los esfuerzos internacionales por democratizar la energía, así como el aumento del consumo de bienes y servicios dentro de países en vías de desarrollo, en algunos casos producto de su reducción de la pobreza. Según datos del World Energy and Climate Statistics (2022) el consumo energético mundial pasó de casi nueve mil megatoneladas equivalentes a petróleo (Mtoe) en 1990 a cerca de quince mil Mtoe en 2022, un aumento de aproximadamente el cincuenta por ciento en tres décadas y que tiende a seguir aumentando (figura 2.1.4).

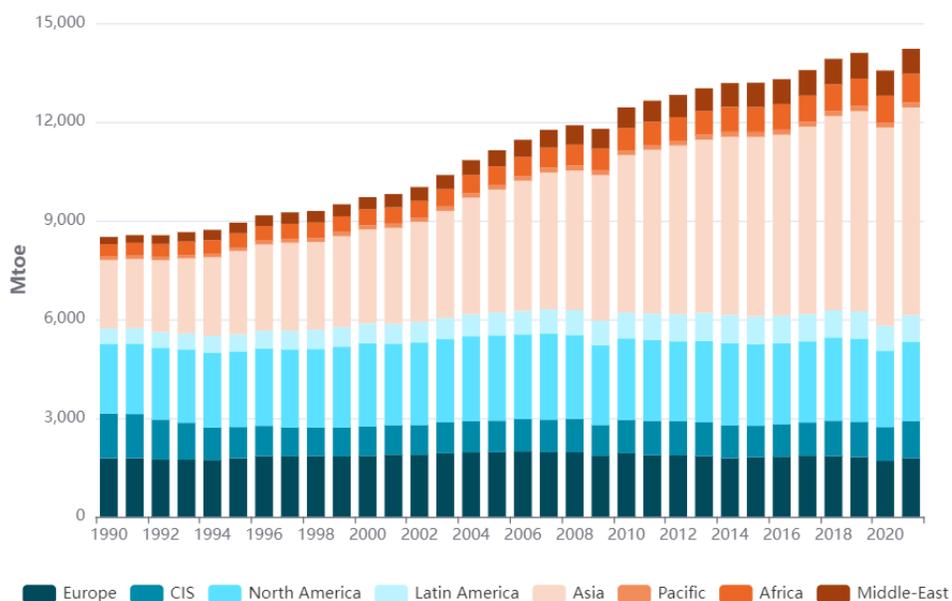


Figura 2.1.4. Aumento del consumo mundial energético por región (WECS, 2022).

Dado este contexto, gobiernos, organismos internacionales, asociaciones civiles e incluso el sector privado de varias industrias se han externado su preocupación e interés por el cambio climático a través de cumbres, congresos y acuerdos que, desafortunadamente, no tuvieron demasiado éxito. El vigente acuerdo mundial se estableció en París durante el 2015, en este los países se comprometieron a tomar las medidas económicas, tecnológicas, políticas y sociales para limitar el aumento de temperatura global a dos grados centígrados respecto al estándar preindustrial durante el próximo siglo con posible extensión a solo un grado y medio para mediados de siglo (ONU, 2015) mientras que en el mismo año, la ONU desarrolló una agenda de desarrollo sostenible que plantea diecisiete máximas establecidas para cumplirse hasta el 2030 que promuevan un mundo más humanitario; de estas el objetivo siete y trece implican energía y ataque al cambio climático ,mientras que al menos otras cinco se ven afectadas por la realidad energética y climática (ONU, 2015). Además, las grandes potencias industriales (las mismas responsables de la mayor parte de las emisiones) han declarado su interés por contribuir, por lo que países como: Estados Unidos, China y la Unión Europea desarrollan políticas e inversiones por las energías verdes que aún se ven superadas por los combustibles fósiles.

De acuerdo con las estadísticas de Our World in Data (2022) el porcentaje de la energía producida por fuentes renovables ha pasado de poco más de seis por ciento a mediados del siglo XX a más del dieciséis por ciento para el 2021 con una notoria caída en la tendencia del año 2000 en adelante (figura 2.1.5).



Figura 2.1.5. Porcentaje de energía renovable producida por año (*Our World in Data*, 2022).

Para el año 2019 la distribución de la producción energética por su origen se repartía como se muestra en la figura 2.1.6, donde se distingue un margen muy pequeño relacionado a la energía eólica con apenas dos punto dos por ciento, implicando esto no solo un reto y un bajo número si no una oportunidad para el desarrollo de esta tecnología en nuevas aplicaciones y otros procesos de desarrollo.

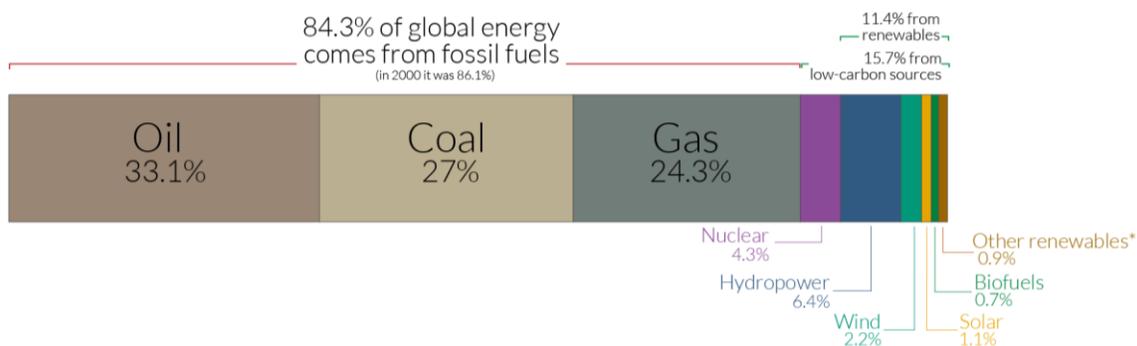


Figura 2.1.6. Porcentaje de fuentes de energía global 2019 (*Our World in Data*, 2020).

En el campo particular de la energía eólica, esta representa la segunda fuente de energía renovable por cuota de producción a nivel mundial después de la

hidroeléctrica. Esta ha mostrado un crecimiento del diecisiete por ciento durante el 2021, como récord histórico y superando en un cincuenta y cinco por ciento el crecimiento del año anterior (IEA, 2022). La figura 2.1.7 muestra las estadísticas de la IEA sobre el avance en la producción energética anual (en terawatts hora) que, si bien manifiesta el aumento antes mencionado, requiere ser cuadruplicado en la próxima década para alcanzar las metas propuestas por la comunidad internacional sobre mantener el aumento de temperaturas en menos de grado centígrado y medio (2022).

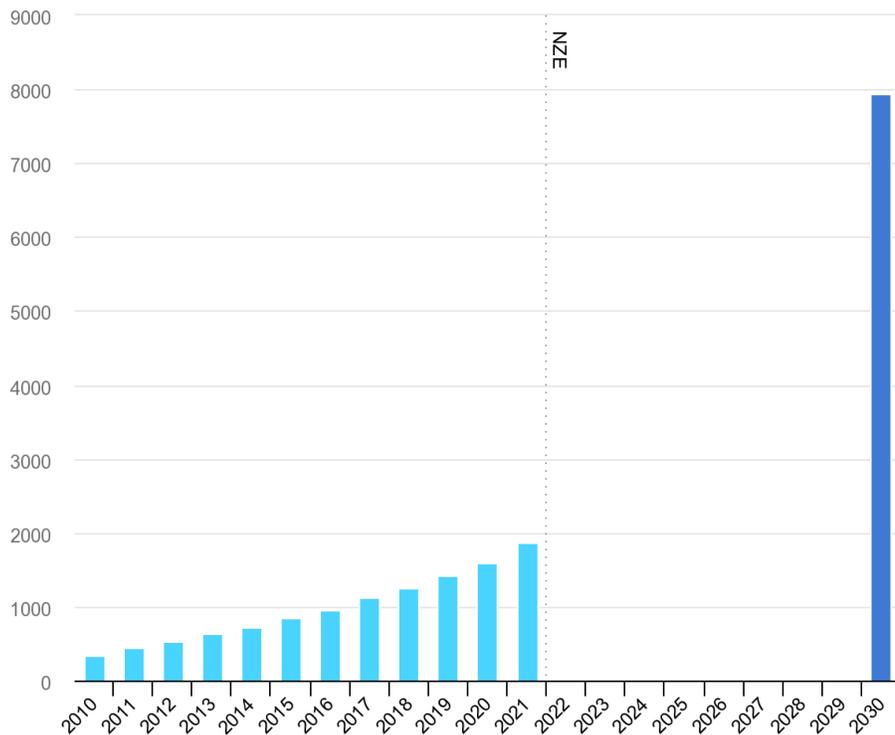


Figura 2.1.7. Electricidad generada por fuentes eólicas anual (IEA, 2022).

Esta información es respaldada por el reporte anual de la Global Wind Energy Community (GWEC) que menciona un rezago no solo en producción si no en nuevos parques eólicos instalados anualmente, como se muestra en la figura 2.1.8, donde la tendencia lineal estimada es notoriamente superada por una demanda casi exponencial (2022).

Lagging growth in this decade leads to wind energy shortfalls by 2030

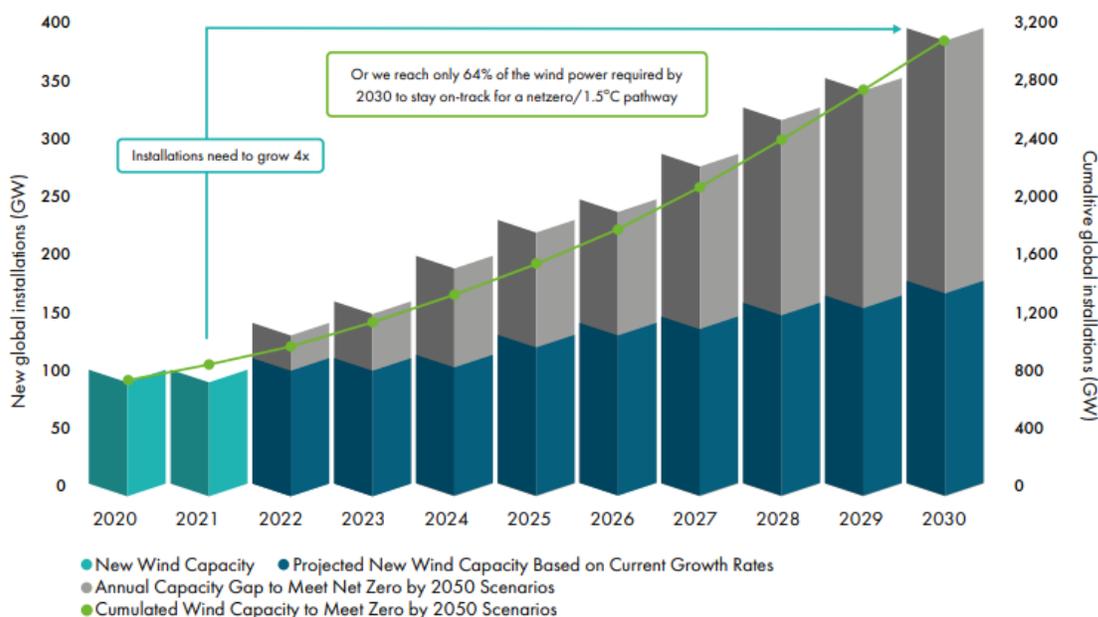


Figura 2.1.8. Instalaciones eólicas anuales proyectadas y requeridas (GWEC, 2022).

Durante la segunda mitad de la pasada década occidente ha disminuido su trabajo en la instalación de nuevas plantas eólicas, mientras que los mercados emergentes de Asia, en concreto China, han mostrado un interés que la ha llevado a representar entre la mitad y más de un tercio de las instalaciones nuevas anuales en todo el mundo tal y como la figura 2.1.9 proyecta (GWEC, 2019). En un reportaje para la revista Bloomberg se mostraron las dificultades que debe enfrentar el mercado occidental de energía eólica, productores que ven afectada la cadena de suministros para la fabricación, acero, cobre y tierras raras por el aumento de precio, limitando la competencia a encarar con fabricantes chinos en constante aumento en su cuota de mercado y una marcada desaparición de los estímulos fiscales que permitían la inversión y favorecían las utilidades de la operación (Mathis et al., 2022).

El reto para las energías renovables impuesto por la comunidad internacional es claramente enorme e indiscutible. Por lo que la industria eólica se ha visto limitada por el paradigma tecnológico establecido, siendo estas nuevas tecnologías que innoven en la fabricación, instalación y funcionamiento de los proyectos brindando la

mayor de las oportunidades para esta industria. El claro ejemplo es el aumento en las instalaciones ultramarinas de parques eólicos (figura 2.1.9).

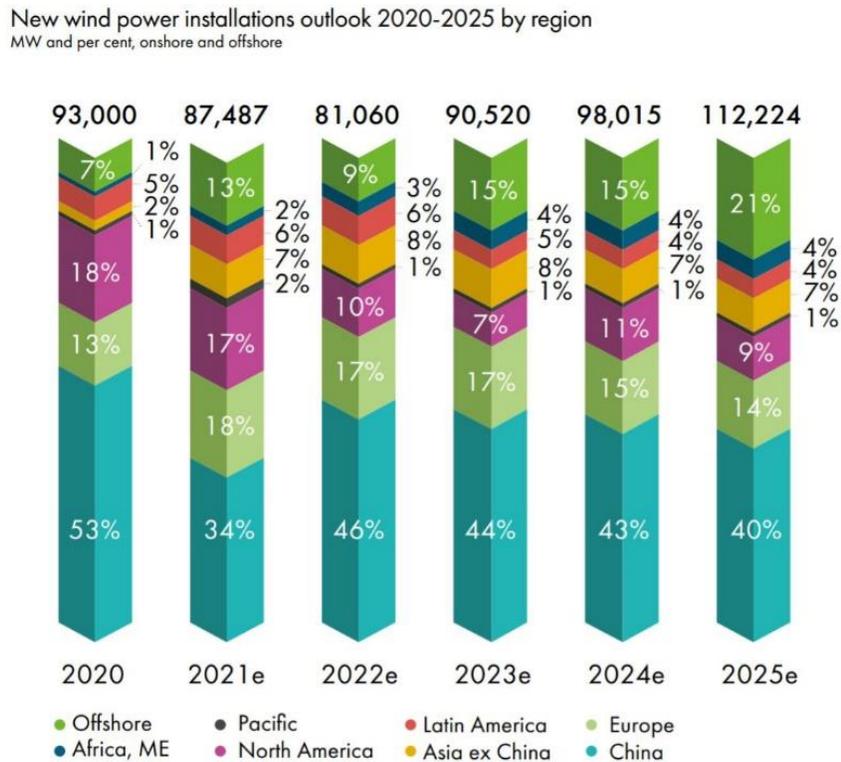


Figura 2.1.9. Proyecciones nuevas instalaciones eólicas mundiales (GWEC, 2020).

2.2.-Internet de las cosas y *energy harvesting*

La otra motivación para la investigación y desarrollo tecnológico planteado está relacionada a una nueva y creciente industria tecnológica ya abordada a rasgos generales en la introducción, el IoT y su reto para la instalación de dispositivos digitales en objetos del día a día.

De acuerdo con la descripción del gigante de la tecnología ORACLE, el Internet de las Cosas implica la interconexión de múltiples nodos digitales instalados en objetos de uso cotidiano dotados de sensores y actuadores comunicados por internet (s.f.). Por su parte, la International Business Machines Corporation o IBM (2016) menciona que *“The IoT is a giant network of connected things and people – all of which collect and share data about the way they are used and about the environment around them”*,

siendo el fin último de esta tecnología la digitalización de la vida cotidiana generada por datos de alta importancia para nuevas áreas de conocimiento como la inteligencia artificial o la ciencia de datos, además de permitir la automatización de procesos desde lo más cotidiano como la preparación de café hasta los más complejos como la navegación autónoma de vehículos.

Está previsto que dentro de la próxima década el número de estos dispositivos instalados crezca de manera acelerada, de casi diez mil millones de dispositivos a cerca de treinta mil millones para 2030, como muestra la figura 2.2.1 (Statista, 2022).

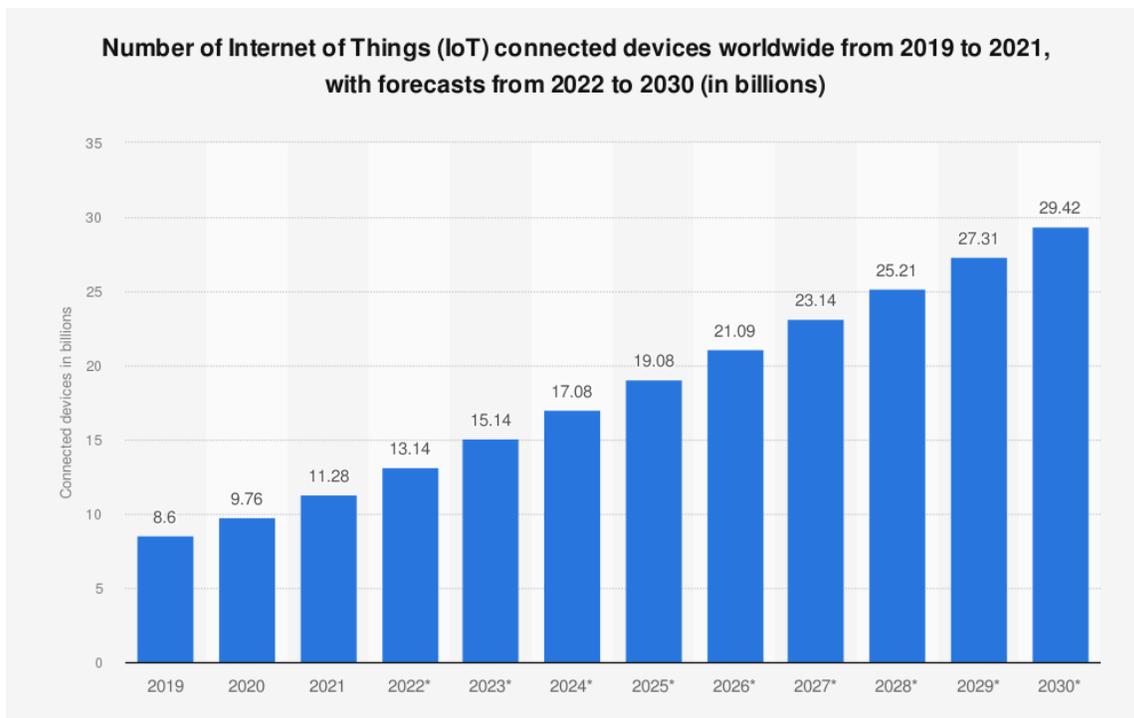


Figura 2.2.1. Proyección dispositivos conectados a internet próxima década (Statista, 2022).

Esta industria promete revolucionar todas las áreas posibles. Desde el sector público con *Smart cities* que mejoren la seguridad, movilidad, servicios y demás aspectos de interés para el gobierno y los ciudadanos. Pasando por la iniciativa privada en aplicaciones industriales, en el agro o el comercio que agilicen la producción, mejoren procesos de distribución y consumo; o para construcciones que respondan a las necesidades de los usuarios hasta llegar al consumo individual, en nuestras casas,

con controles de acceso y seguridad, electrodomésticos reactivos y herramientas de control vanguardistas.

Los principales retos de esta industria, con amplio campo de oportunidad para los desarrolladores, incluyen la conectividad y la robustez requerida a la infraestructura de telecomunicaciones. También se presenta el tema de seguridad y privacidad de los datos en su generación, comunicación y uso. Finalmente, el obstáculo de producción, instalación, mantenimiento, alimentación y demás demandas del hardware, siendo este último abordado en el presente trabajo.

El cosechamiento de energía es una tecnología aun en estado del arte y que se encuentra en constante desarrollo, pero que promete una alternativa viable para alimentar dispositivos remotos o limitados por la infraestructura ya existente. Estas propuestas de generadores eléctricos optan por fuentes poco convencionales de las que extraer la electricidad. Trabajos en celdas fotovoltaicas como la opción menos extravagante, sistemas termoeléctricos, antenas de radiofrecuencia, biocombustibles, microorganismos y, como es el caso del presente trabajo, vibraciones mecánicas aplicando piezoeléctricos.

La fuerza que absorbe el suelo cuando damos un paso, la presión de los automóviles sobre el pavimento, sonidos fuertes o las vibraciones de una máquina en movimiento son algunos de los existentes casos de aplicación piezoeléctrica en la generación de energía de baja potencia, todos en cierto grado limitados en su potencia de generación. Pero representando ya, posiblemente, el mayor campo de investigación dentro de esta nueva industria y no solo en su uso sino en nuevas alternativas de materiales que mejoren el rendimiento, la durabilidad, el costo y el impacto ambiental de estos.

Capítulo 3: Antecedentes

3.- Energía eólica

Entendiendo el viento como una fuerza natural presente en todos los ecosistemas y vital para los procesos medioambientales, no es sorpresa encontrar ejemplos en todas las culturas antiguas del mundo. Como las deidades que demuestran que se venera este poder de la tierra, tales como: Amón de los egipcios; Ehécatl en Mesoamérica; Kon de los incas; La'a Maomao para los polinesios; Vailu en el hinduismo o Eolo para los griegos (origen de la palabra eólico) son algunas muestras del respeto y consciencia de las civilizaciones en todas partes del mundo, pero, sobre todo, la magnitud del poder de este fenómeno.

La fuerza del viento como motor de transformación es aprovechada por el ser humano desde hace ya más de cinco milenios (Anderson, 2003). Tal es el caso como se muestra en más de una ilustración ya confirmada procedente de la cultura egipcia (aunque podríamos afirmar que no fue exclusiva de esta y que se dio de forma aislada en otras culturas antiguas), donde se distinguen embarcaciones con un sistema completo de mástil y cuerdas para controlarlas similar al de la figura 3.1.1. Esta tecnología fue la responsable de la industria marítima hasta la invención de la máquina de vapor durante la revolución industrial; claro que, presentando una evolución notable en la complejidad de los sistemas de propulsión naval, teniendo un rol determinante para las culturas que utilizaron esta tecnología potencializadora del poder político y económico.



Figura 3.1.1. Ilustración egipcia embarcación con velas (BBC Mundo, 2019).

Ya como propulsor mecánico de herramientas, el viento fue utilizado en los molinos de viento para triturar grano y extraer agua (Moragues y Rapallini, 2003) en el siglo VI en las zonas de Irán y Afganistán (se cree que estos podrían datar de incluso 500 A.C.) así como molinos verticales en zonas mediterráneas como Grecia. Estas “Panemonas” siguen siendo utilizadas en la molienda tradicional de la región. Para el siglo XI se popularizaron en medio oriente y, debido a las cruzadas europeas, esta tecnología viajó a occidente para el siglo XIII.

Durante la edad media el uso de los molinos se propagó por los reinos europeos empleada para la molienda de grano, cuando en el siglo XIV los países bajos comenzaron la invención de nuevos sistemas que permitieran aplicar esta tecnología a otras aplicaciones y aumentando con creces la potencia y eficiencia de esta. Algunos ejemplos fueron la maquinaria hidráulica para canales y drenajes, los procesos industriales para la fabricación de papel o trabajo con madera y desempeñando potencias de hasta 90 caballos. Estos fueron sustituidos por las máquinas de vapor y su uso quedó casi extinto para el siglo XX (Moragues y Rapallini, 2003).

Ya con la llegada de la energía eléctrica, un segundo aire para los molinos de viento apareció. Con vagas evidencias de máquinas que implementaban generadores eléctricos en embarcaciones y exhibiciones científicas desde 1876, oficialmente se considera que James Blyth del Anderson’s College in Glasgow fue el primero en aprovechar los avances logrados durante el siglo XIX por Hippolyte Pixii, Antonio Pacinotti, Werner Von Siemens, Charles Wheatstone o S.A. Varley en dínamos como generadores eléctricos de corriente continua, conectando una de estas piezas electromecánicas a un molino de viento (Owens, 2019). Según Owens (2019) casi simultáneamente, el norteamericano Charles Brush diseñó un molino de viento conectado a un generador eléctrico con palas para controlar la orientación de este respecto al cambio de dirección del viento (figura 3.1.2).

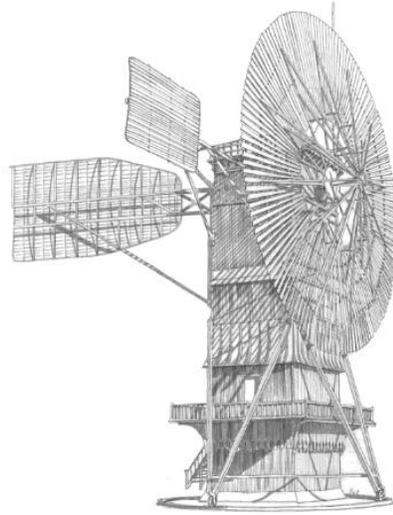


Figura 3.1.2. Ilustración molino generador eléctrico de Charles Brush (Owens, 2019).

Los modelos antes mencionados se veían limitados por la velocidad de giro de las aspas que implicaba una baja producción eléctrica, además de los problemas en la producción y el suministro que estaban relacionadas con el cambio del clima. En 1891 el danés Poul la Cour, quien, dadas las condiciones de su contexto que requerían instalaciones eléctricas en zonas rurales de bajo costo además de ambición por el desarrollo tecnológico, implementó mejoras en el concepto. Aplicando el diseño inglés de molino de viento inventadas en Inglaterra por Andrew Meikle en 1772, cambió el modelo de aspas por solo cuatro palas que, en vez de usar velas de lona, eran formadas por rectángulos rígidos, como se muestra en la figura 3.1.3. Reduciendo el torque obtenido, pero aumentando la velocidad de giro en el sistema (Owens, 2019).



Figura 3.1.3. Ilustración molino generador eléctrico de Poul la Cour (Owens, 2019).

La Cour también implementó un mecanismo interno en el molino llamado *Kratostate* (Owens, 2019). Incorporado por un sistema de poleas con peso que ajustaban la tensión de estas de acuerdo con la velocidad de giro del modelo conectando el eje de las aspas al del rotor con el fin de mantener constante la velocidad a la que el generador rota y así obtener corriente constante que mantuviera segura la instalación eléctrica (figura 3.1.4).

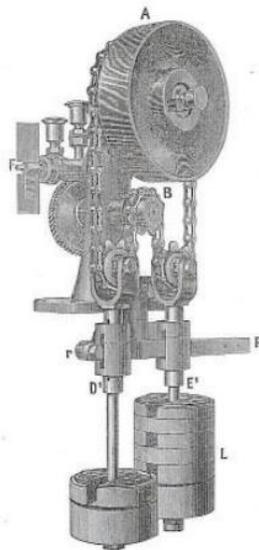


Figura 3.1.4. Kratostate creado por Poul la Cour (Pagh, s. f.).

La última de las innovaciones de trascendencia desarrollada por la Cour constó en la manera en la que almacenó la energía producida. Dado el alto precio de las baterías eléctricas de ese tiempo, la Cour optó por emplear el proceso químico desarrollado por Pompeo Garuti, profesor italiano que trabajó con el proceso de hidrólisis (Owens, 2019), y que, implementado para almacenar energía, permitía una alternativa barata que daba como resultado combustible útil para quemar (aunque peligroso dada la poca especialización del proceso en ese momento, causando frecuentemente la mezcla del hidrógeno y el oxígeno pudiendo derivar en explosiones).

Dada las condiciones de la industria eléctrica naciente a finales de 1800 y principios de 1900, que incluyen la consideración de costos, rendimiento, operabilidad y otro tanto de factores económicos, políticos y tecnológicos, la energía eólica como fuente de electricidad no tuvo particular importancia reduciendo su desarrollo a apenas unas cuantas empresas. Lewis Electric Company, Fairbanks, Morse and Company, Aermotor Company en América, Fassenden y Rollasen Wind Motor Company en Reino Unido, Sthalwind, Dresden, Koster y Heide/Holstein en Alemania. Todas estas empresas dejaron de operar a finales de la primera década del siglo XX y fue gracias al trabajo del danés la Cour que el generador eólico se siguió desarrollando (Owens, 2019).

El avance determinante durante esta época se dio sumado al descubrimiento de los hermanos Wilbur y Orville Wright, quienes al principio del siglo XX consiguieron el primer vuelo humano. Las alas de la aeronave inventada por estos hermanos probaron un fenómeno de sustentación provocado por el efecto Bernoulli sobre estas (se abordará a profundidad en el marco teórico) que con la llegada de la Primera Guerra Mundial entró en periodo de investigación y desarrollo. Al terminar la guerra, la tecnología desarrollada para las hélices de los aviones fue íntegramente copiada para dar lugar a la turbina eólica moderna (Owens, 2019).

Este cambio fue de gran relevancia dado que los molinos de viento ancestrales priorizaban el torque sobre la velocidad. Esto dado a que eran usados como propulsores de máquinas pesadas para industrias específicas, mientras que la industria eléctrica requería una mayor velocidad de giro en los rotores para que la

energía obtenida fuera la adecuada a inyectar en los sistemas de distribución (Owens, 2019).

Durante este periodo no hubo un mayor avance en el uso de esta tecnología. Lo destacable en la historia de las turbinas eólicas durante las siguientes décadas fue la discusión sobre cómo utilizar el nuevo diseño de aspas en cuanto a su diseño, número y disposición. Teniendo particular aportación de los alemanes Kurt Bilau y sus diseños y modelos, así como del físico Albert Betz quien en el estudio teórico de las turbinas eólicas demuestra matemáticamente las limitantes de rendimiento en la extracción de energía del aire. La aplicación de la tecnología se limitó a máquinas de tamaños reducidos y como alternativa para zonas con ausencia de red eléctrica como la mostrada en la figura 3.1.5.



Figura 3.1.5. Turbina eólica comercial años 30's y 40's (Owens, 2019).

A partir de este punto, la industria de las turbinas eólicas de menor tamaño comenzó a reducirse por la creciente presencia de la infraestructura eléctrica y el bajo costo de la electricidad. Sendo este suceso consecuencia de la disponibilidad de recursos naturales, principalmente el carbón. Por otro lado, la investigación y desarrollo de las turbinas eólicas de gran tamaño se retomó a mediados del siglo XX en academias y proyectos de investigación gubernamentales.

En octubre de 1941 se instaló la primera turbina eólica capaz de generar un mega watt de electricidad en Vermont, Estados Unidos. Diseñada por el ingeniero *Palmer Cosslett Putnam*, quien aprovechó los modelos de fabricación de la industria aeronáutica para construir dos palas de veinte metros e instalarlas a treinta y seis metros de altura. Esta funcionó durante tres años mostró problemas mecánicos y no fue reparada hasta después de la Segunda Guerra Mundial, operando un par de semanas más y terminando con un fatal accidente en el que una hélice se desprendió y voló más de doscientos metros.

En Dinamarca en 1956, Johannes Juul (alumno de Poul la Cour) desarrolla una mega turbina eólica de tres palas (figura 3.1.6). Lo logró marcando un hito en tecnologías de seguridad, llegando a ser requeridos por proyectos de investigación de la NASA (Vestergaard, 2004).



Figura 3.1.6. Turbina Johannes Juul 1956 (Danish Wind Industry Association, s. f.).

Durante la década de los años 50's y 60's los bajos precios del carbón y el petróleo detuvieron en gran medida el desarrollo comercial de esta industria hasta 1973. Cuando, derivado de un conflicto velico en Medio Oriente, el mundo enfrentó la primera crisis energética moderna, con una subida de los precios drástica y una

escasez que provocó alertas en las potencias occidentales detonando la industria de energía eólica contemporánea y llevándola a su situación actual (Vestergaard, 2004).

En 1980 se instaló la primera granja eólica en New Hampshire, Estados Unidos con veinte turbinas que mostraron diversas fallas. Mientras que una década después, en 1991 en Vindeby, Dinamarca, se instala la primera granja eólica de ultramar (Johansen, 2021) siendo este el paradigma de producción actual: granjas continentales o marítimas con sus respectivos retos y beneficios.

Actualmente, el desarrollo de turbinas eólicas se centra, para los de eje horizontal, en aumentar el área transversal de aire captado con el aumento de la longitud en las palas para la obtención de corrientes de viento más veloces y de flujo laminar instalando los molinos a una mayor altura; el mejoramiento en el diseño del ángulo de ataque de las palas adecuado a las condiciones de cada instalación y el control de estas para reaccionar al cambio de clima y en el desarrollo de parques en ultra mar con todos los retos logísticos y técnicos para la infraestructura, instalación y mantenimiento. Por otro lado, para aerogeneradores de eje vertical se aplican nuevos diseños en la estructura y la disposición de las palas, así como en el ángulo de ataque de estas para obtener propiedades interesantes como funcionar con viento proveniente de todas direcciones, creando un modelo más estable de controlar y operar de manera reactiva como con el cambio de ángulo de perfil para mantener una velocidad estable y la instalación más próxima entre generadores por la baja perturbación de estos sobre el aire captado (menor turbulencia a la salida). Todo esto a cambio de un menor rendimiento eléctrico y un tamaño limitado de instalación.

5.2.- Piezoeléctricos

Prácticamente en simultáneo al desarrollo de los aerogeneradores, los científicos descubrieron la piezoelectricidad. Esta es una propiedad de ciertos materiales, generalmente cristalinos, de transformar un tipo de energía en otra (transductor) que será de amplia importancia para la electrónica de finales del siglo XX y posteriores.

En 1880 los hermanos Jaqués y Pierre Curie descubrieron que, al aplicar tensión o presión sobre algunos cristales, estos se polarizaban eléctricamente y en proporción a la magnitud de la fuerza aplicada en el proceso. Utilizaron para el experimento cuarzo, topacio, sal de Rochelle, turmalina entre otros (Gomez, 2018) en una máquina diseñada por ellos mismos en la que los cristales se sometían a una tensión y dos placas unidas a los laterales del material percibían las cargas eléctricas generadas. Además, se podía observar cómo al detener la aplicación de fuerzas mecánicas sobre la muestra, estas cargas también desaparecían (Figura 3.2.1). A este fenómeno se le llamó «efecto piezoeléctrico» para distinguirlo de otras propiedades de los materiales como la piroelectricidad o electricidad por contacto, causados por temperatura y fricción respectivamente (Piezoeléctrico, s.f.).



Figura 3.2.1. Prensa mecánica para medición de fenómeno piezoeléctrico en cuarzo (Gómez, s. f.).

Casi en simultáneo a los hermanos Curie, en 1881 el físico francés Gabriel Lippmann utilizó teoría de termodinámica para establecer teóricamente que el fenómeno piezoeléctrico inverso al aplicar electricidad sobre la superficie de un cristal de este tipo, la deformación mecánica se producirá sin la aplicación de fuerza mecánica externa (Gómez, 2018). Esta teoría fue comprobada por los hermanos Curie de manera experimental posteriormente.

Durante los siguientes dos años en Europa se profundizó el trabajo en esta área. Logrando establecer una lista de materiales tanto de propiedades piezoeléctricas como la causa del efecto relacionado a las estructuras cristalinas asimétricas basada en termodinámica y desarrollando la teoría necesaria para aplicar esta propiedad en nuevas tecnologías (Gómez, 2018).

Para 1910 el físico alemán Woldemar Voight publica un trabajo que contiene una lista de veinte cristales de la naturaleza y sus coeficientes piezoeléctricos. Este trabajo como el resultado de sus estudios bajo las leyes de la termodinámica y la teoría de análisis tensorial geométrico. Lo que hizo posible el desarrollo científico y tecnológico posterior y se estableció como estándar (Gómez, 2018).

Dado que la piezoelectricidad coexistía con el desarrollo electromagnético, se vio opacado por su bajo rendimiento y alta complejidad matemática. No fue hasta 1917 que, en el marco de la Primera Guerra Mundial, el físico Paul Langevin desarrolló un radar ultrasónico utilizado para detectar submarinos en mar abierto. Este dispositivo constaba de un transductor de cuarzo con una frecuencia de resonancia de 50kHz que generaba sonido de muy alta frecuencia. Estas ondas al atravesarse con una superficie sólida como rocas, hielo, un animal grande o una embarcación rebotaban y eran escuchadas por un micrófono receptor. Con el tiempo transcurrido en el proceso era posible estimar la distancia a la que se encontraba el objeto, según la orientación de la señal se estimaba la posición y de acuerdo con la intensidad de aproximaba el tamaño.

A partir del buen rendimiento del sonar ultrasónico piezoeléctrico entre la Primera y Segunda Guerra Mundial, se dedicaron más recursos de la comunidad científica en los países desarrollados para mejoramiento de la tecnología y nuevas aplicaciones de interés como sensores basados en frecuencia útiles en experimentación científica de materiales sólidos o propiedades de fluidos fueron de uso compungido. Así se sentaron las bases del uso de sensores piezoeléctricos comunes en la electrónica de consumo actual como: micrófonos, bocinas, giroscopios, entre otros. Todos estos usos con la limitante del bajo rendimiento de materiales naturales, principalmente el cuarzo.

Llegada la Segunda Guerra Mundial las potencias mundiales involucradas en la carrera armamentista como Estados Unidos, La Unión Soviética o Japón, hicieron investigaciones de materiales piezoeléctricos dando lugar a cerámicas y ferroeléctricos con propiedades cien veces superiores a los cristales de origen natural con nuevas aplicaciones y reavivando el interés por su investigación (Gómez, 2018). El titanato de bario y el zirconato de plomo (BaTiO_3 y PZT respectivamente) fueron fundamentales para los avances de la época por su gran desempeño y relativa facilidad de producción en masa. Siendo responsables de esta nueva ola de innovación tecnológica dieron lugar a nuevos sonares, bocinas y micrófonos de alta y baja potencia con alto desempeño y de fácil producción por su diseño reducido en complejidad además de en general, un bajo costo de materia, sumado a nuevas aplicaciones como encendedores por ignición piezoeléctrica o relevadores eléctricos.

Durante la Segunda Guerra Mundial también se hizo un avance importante en la metodología de desarrollo de materiales y aplicaciones piezoeléctricas. Hasta ese momento, la tecnología que aprovechaba esta propiedad se ajustaba a las capacidades de los cristales conocidos mientras que con el desarrollo de materiales empezaría a hacerse de manera contraria, determinando la aplicación y creando un cerámico o un ferroeléctrico que tuviera las propiedades deseadas (comúnmente fregando impurezas metálicas que ajustaran los coeficientes piezoeléctricos y las características mecánicas). Además, en este tiempo se entendió a profundidad la estructura de cristal Perovskite y su efecto mecánico-eléctrico, causante del efecto piezoeléctrico.

Posterior a la guerra, dado el estatus de trabajo de las empresas en calidad de alto secreto y el paradigma relacionado entre la patente y los procesos de desarrollo-producción secretos con un alto rendimiento económico, causaron que en los Estados Unidos el desarrollo de nuevos materiales se limitara a unas cuantas instituciones y pocos intereses por innovar. Mientras tanto, en Japón el sector privado y público unieron esfuerzos en el desarrollo y aplicación de nuevos materiales piezoeléctricos en la «*competitively cooperative*», organización que unió a todas las empresas

dedicadas a la industria y las universidades con proyectos de investigación en este campo de estudio desde 1951.

Derivado de los esfuerzos de los japoneses, en el área se desarrollaron nuevos materiales con propiedades similares a los creados en Estados Unidos. Pero estos fueron totalmente libres de patentes u otras limitaciones legales para su desarrollo, producción o aplicación. Así como otros con propiedades totalmente nuevas como el polifluoruro de vinilideno o PVDF, un polímero con nuevas propiedades mecánicas que ofrecía un nuevo campo de aplicación (Gómez, 2018). Por esta razón el mercado asiático hasta la década de los 80's fue el responsable e incluso único factor de innovación de esta industria, creando nuevos componentes para electrónicos como televisiones, radios y otras comunicaciones con mejores filtros, componentes de sonido como micrófonos y buzzers o transductores ultrasónicos.

Desde los años 80's hasta el presente, las demás economías desarrollaron un nuevo interés por esta industria dado el beneficio obtenido por el mercado japonés. Aumentaron la inversión y las expectativas en nuevas aplicaciones y mejores propiedades de estos materiales. Actualmente el desarrollo principal se centra en actuadores de estado sólido que permitan movimientos con muy bajo consumo eléctrico, poca necesidad de mantenimiento, resistencia a ambientes hostiles entre otros; así como su aplicación en procesos de *Energy Harvesting* para la industria electrónica exactamente por las mismas propiedades enconadas antes.

Capítulo 4: Marco teórico

4.1.- Aerogeneradores

Comenzando por una breve explicación sobre el origen del viento, las corrientes de aire utilizadas por los aerogeneradores son un fenómeno meteorológico producto de la interacción entre la energía solar y la atmósfera terrestre en un proceso autorregulación. Junto con la rotación terrestre, el viento es producto de masas de aire cargadas de energía cinética en movimiento desde zonas de alta presión hasta otras con menor presión. Estas diferencias entre regiones son consecuencia del aumento y

disminución de las temperaturas del gas en la atmósfera al contacto con los rayos de sol durante el día, la noche o momentos de sombra, además de variar según el ángulo en que la luz atraviesa la tierra y es sujeta a refracción y reflexión cediendo energía y dando lugar a esta distribución no homogénea. Con esta liberación de energía el aire es calentado, aumentando su volumen generando estas zonas de alta y baja presión que provocan las corrientes de viento.

El viento al estar compuesto por una masa de aire en movimiento es un fluido en flujo. Está integrado por partículas de gas que actúan casi con total independencia una de la otra por lo que desempeña un comportamiento difícil de describir matemáticamente hablando. Sin embargo, se mencionarán los rasgos más importantes para comprender los tipos de flujos y sus propiedades, así como el fenómeno que da lugar a estos.

El aire es una mezcla homogénea de gases atmosféricos (setenta y ocho por ciento nitrógeno, veintiún por ciento oxígeno, otro pequeño porcentaje de gases y vapor de agua según la temperatura y región de la medición). Y, como tal, tiene una densidad variable que de manera estandarizada se considera que a presión del nivel del mar (una atmósfera) y la temperatura templada (quince grados centígrados) según la Atmósfera Estándar Internacional (ISA) y sin considerar condiciones extremas en la humedad del aire, esta es de un kilo doscientos veinticinco gramos por metro cúbico.

Otra propiedad fundamental de los fluidos es la viscosidad. Como descripción básica implica la resistencia de estos materiales al movimiento y las fuerzas que se le aplican (producto de la termodinámica), y se puede razonar como la resistencia al movimiento que ejercen una de las partículas componentes sobre la otra. Un ejemplo de la viscosidad es en el ejercicio de un fluido en flujo dentro de un tubo que tendrá una clara diferencia en la velocidad del movimiento de las partículas en contacto con la superficie del contenedor y las que se encuentran al centro de la sección en movimiento solo viéndose afectadas por la resistencia que ejercen las partículas a su alrededor. Esta propiedad puede entenderse de manera absoluta como en la ecuación 4.1.1 de viscosidad dinámica donde F_t es la fuerza tangencial, s la superficie, v la velocidad dentro placas del flujo que se comporta en láminas, y el espesor de la lámina

y μ la viscosidad dinámica que en el caso del aire, a cero grados centígrados, uno punto siete por diez a la menos cinco pascales por segundo o relativa a la densidad como en la ecuación 4.1.2 de viscosidad cinemática donde ρ es la densidad del fluido, μ la viscosidad dinámica y ν la viscosidad cinemática con un valor de trece punto tres metros cuadrados sobre segundo para el aire.

$$\mu = Ft * \frac{y}{s*v} \quad (4.1.1)$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (4.1.2)$$

Dadas estas propiedades de los fluidos ya establecidas es posible describir el concepto de flujo de estos y el comportamiento que se observa dentro de los distintos tipos de flujos. El flujo implica en mecánica de fluidos el movimiento de estos tal y como lo son las corrientes de viento, el agua atravesando una tubería, entre otros muchos ejemplos cotidianos de masas líquidas o gaseosas que se desplazan en su medio. Para análisis prácticos se suele definir un fluido ideal sin capacidad de ser comprimido y sin viscosidad. Estas dos afirmaciones no suelen ser compatibles con los gases más que en modelos específicos donde estos sucesos son existentes pero despreciables.

Para el análisis de un flujo se determina un área, generalmente transversal a la dirección del fluido en movimiento, que será atravesada por este conjunto de partículas y se analizará másica o volumétricamente (según el caso y las necesidades del estudio) en el paso que tienen por unidad de tiempo, además se puede atacar el problema con distintas técnicas planteadas por científicos del área. El método Lagrange que a grandes rasgos analiza el flujo de los fluidos desde sus piezas elementales, las partículas, y su comportamiento durante el proceso, mientras Euler dispone un volumen a criterio y hace el estudio de los totales que entran y salen de este. La unidad de medición para el flujo se establece como litro por minuto, metro cúbico por segundo y kilogramo por hora, entre otras.

El estudio del flujo puede separarse de acuerdo con múltiples aspectos, pero para los fines de este documento solo es importante el comportamiento de este en el proceso de movimiento y el orden que mantienen las partículas internas. Para hacer

esta distinción hay que establecer la línea sobre la que la media de esta masa se va a desplazar y las condiciones en las que el fluido se encuentra (propiedades como viscosidad o externas como temperatura) y determinar tanto matemática como experimentalmente si se trata de un flujo laminar (con movimiento ordenado de las capas del fluido formadas por sus partículas), turbulento (con movimiento en múltiples sentidos aleatorios con corrientes de partículas independientes a la de la media de la masa) o de transición (el punto en el que el que el comportamiento cambia). Ver la figura 4.1.1.

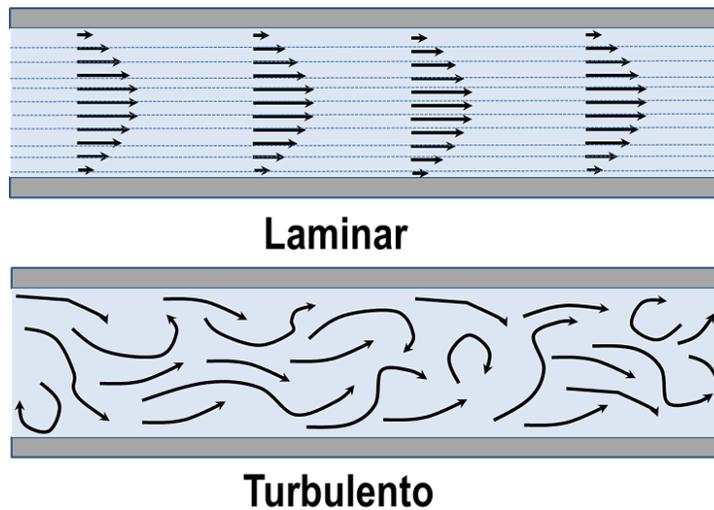


Figura 4.1.1. Flujo laminar y turbulento (Wikimedia Commons, 2014).

Este fenómeno está determinado por estos múltiples factores y dependiendo las peculiaridades del caso de estudio se debe utilizar un método. Con la intención de ejemplificar esto podemos describir el número de Reynolds, resultado de una ecuación desarrollada por el científico inglés George Gabriel Stokes en 1851 que relaciona las fuerzas consecuencia de la viscosidad del fluido con las de la inercia a causa del movimiento de las partículas para determinar si se trata de un fluido laminar, turbulento o en fase de transición como en la ecuación 4.1.3, donde los valores superiores de la fracción son los relacionados con la inercia (diámetro por el que se mueve el fluido D , velocidad de movimiento v , densidad del fluido ρ) y el valor inferior μ de la fuerza de viscosidad dinámica. Un estándar para interpretar el número de Reynolds es un valor

pequeño, menor a dos mil, que indica un flujo laminar mientras que un número grande, superior a cuatro mil determina turbulencia y los valores intermedios se entienden como fase de transición.

$$Re = \frac{\rho Dv}{\mu} \quad (4.1.3)$$

Este comportamiento de los fluidos es mencionado dado que los aerogeneradores aprovechan el flujo de aire que nombramos comúnmente viento y porque los aerogeneradores están diseñados para aprovechar viento laminar y no turbulento. Dando como resultado a que estos se instalen a mayores alturas y con determinada distancia entre ellos (ya que el efecto del aerogenerador sobre el viento tras la interacción es la turbulencia de este último).

Regresando al aire y su flujo, por ser un grupo de partículas con masa en movimiento es posible estimar la energía cinética del viento y su potencia gracias a las ecuaciones 4.1.4 y 4.1.5. La energía cinética es aquella relacionada con el movimiento de un objeto con masa (4.1.4), en este caso, por tratarse de una masa/volumen y no un sólido se relaciona con la densidad del fluido y el área atravesada por este flujo másico, derivado en el tiempo, siendo esta relación con el tiempo lo que permite relacionarla a la potencia presente (4.1.5).

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad (4.1.4)$$

$$P = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (4.1.5)$$

Como se menciona anteriormente, el viento es una masa en movimiento que por definición está cargado de energía (cinética) aprovechable si se toma parte de esta fuerza como propulsión. Recordando que estos flujos (con fuerza) al contacto con una superficie (con área) causan una presión sobre este como describe la ecuación 4.1.6 que es usada por velas de embarcaciones y molinos tradicionales.

$$P = \frac{F}{A} \quad (4.1.6)$$

Por otro lado, aunque similar, las palas de los aerogeneradores modernos tienen un funcionamiento distinto a este basado en la sustentación, fenómeno presente sobre los cuerpos rígidos que se desplazan de manera perpendicular al flujo de un fluido (figura 4.1.2). Ejemplo de este efecto físico es la capacidad de volar de los aviones o el empuje contra el suelo que tienen los automóviles con alerones o *spoiles* y que, como ya se había mencionado antes, es descubierto por los hermanos Wright a principios del siglo XX dando lugar a las aeronaves modernas y, claro, a turbinas de propulsión con mejores rendimientos (para agua y aire) y las palas de aerogeneradores.

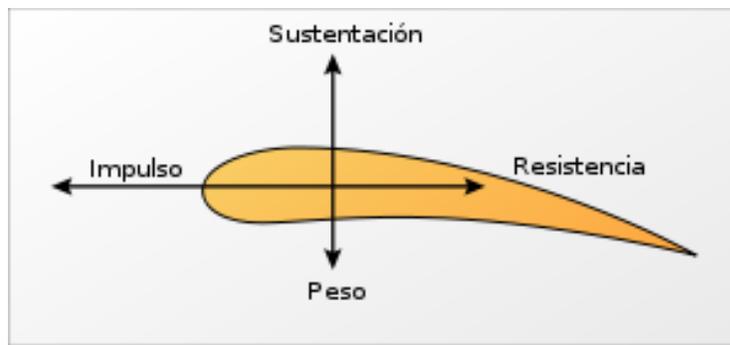


Figura 4.1.2. Principio de sustentación (Wikipedia, 2023).

La sustentación tiene su explicación física tanto a leyes fundamentales de Newton o en el principio de Bernoulli. Dos explicaciones ampliamente difundidas pero que para propósito del presente solo usaremos la explicación dada por Bernoulli por ser la más aceptada por expertos de la materia. Pero, también se describirá la lógica de la aproximación newtoniana.

El principio de Bernoulli relaciona la velocidad de un fluido, la presión de este y el área transversal que este flujo atraviesa al tener que mantener la misma energía. Esta ecuación indica que la energía de un fluido es constante, por lo que si lo descomponemos en la presión (P), cinética (V de velocidad y ρ de densidad) y potencial (g de gravedad h de altura y ρ de densidad) podemos calcular su magnitud, además de describir variaciones en estos componentes según el caso (ecuación 4.1.7).

$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 + gh = \text{constante} \quad (4.1.7)$$

Entendiendo este valor constante es posible afirmar que en una aplicación donde mantengamos el mismo flujo modificado en estos parámetros, el resto de los valores se puede determinar matemáticamente como la ecuación 4.1.8 para el modelo de la figura 4.1.3.

$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 + gh = P + \frac{1}{2}\rho v^2 + gh \quad (4.1.8)$$

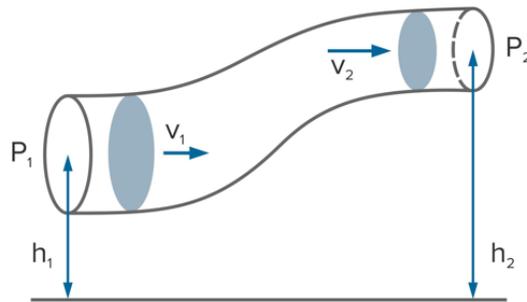


Figura 4.1.3. Tubo de Bernoulli (Freepik, 2022).

Este descubrimiento matemático hecho por Daniel Bernoulli en 1738 fue una gran aportación a la física en mecánica de fluidos. Una aplicación clara es la descrita en el efecto Venturi (ecuación 4.1.9), que no es más que una aplicación de la ecuación 4.1.3 sobre un modelo específico como el mostrado en la figura. 4.1.4 para calcular el cambio en la presión de un fluido respecto a su velocidad, en este caso por la disminución o aumento del área transversal por el que pasa.

$$P1 - P2 = \frac{\rho(v_2^2 - v_1^2)}{2} \quad (4.1.9)$$



Figura 4.1.4. Tubo de Venturi (Rural, 2019).

De tal manera que la explicación de este fenómeno para la sustentación dicta que el flujo de un fluido que es dividido por el cuerpo rígido somete a dos movimientos distintos con distancias que recorrer con mayor longitud en la cara de arriba en comparación con la de abajo. Además de áreas transversales reducidas por la parte superior y aumentadas en la inferior creando una diferencia de presiones sobre las dos superficies, una que empuja desde abajo del cuerpo y otra que jala por arriba (positiva y negativa) como se muestra en la figura 4.1.5.

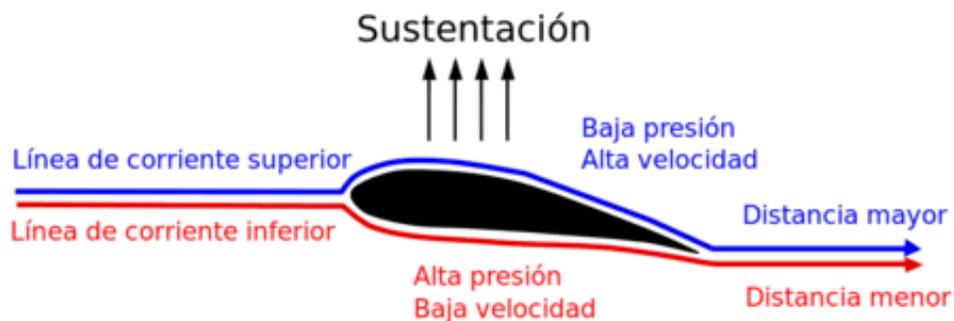


Figura 4.1.5. Efecto Bernoulli de sustentación aerodinámica (Montero, 2020).

Por otro lado, la tercera ley de Newton indica que, siempre que un objeto aplique una fuerza, este otro cuerpo estará ejerciendo una fuerza igual en magnitud, pero opuesta en dirección sobre el primero. De esta manera las leyes del movimiento de Newton explicarían el fenómeno de sustentación basado en la afirmación de que el viento al entrar en contacto con la superficie inferior del objeto transfiere una fuerza, mientras que el aire que rodea el perfil se someterá a un posterior cambio de dirección,

consecuencia de una fuerza aplicada por el objeto dando lugar a un empuje igual en sentido contrario como muestra la figura 4.1.6.

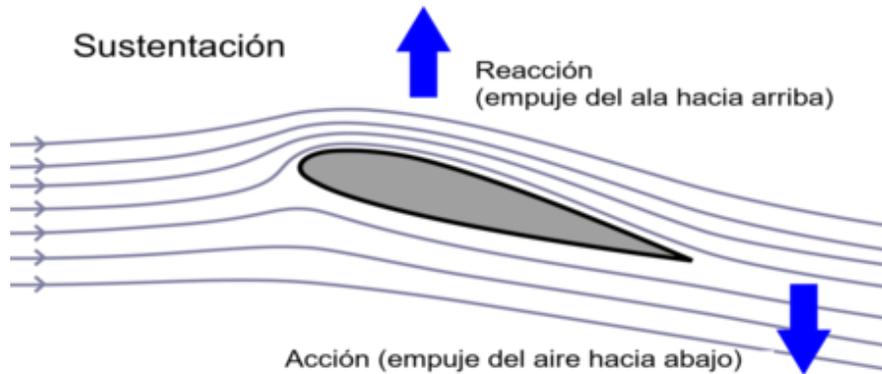


Figura 4.1.6. Tercera ley de Newton en la sustentación aerodinámica (Montero, 2020).

La sustentación es estimada de manera experimental con respecto a cada geometría propuesta y el ángulo en que este se posiciona respecto al flujo del viento. Para fines prácticos y por ser los modelos usados comúnmente, además de no ser de mayor relevancia para el modelo diseñado la geometría que se explicará, será en forma de gota como la de las imágenes anteriores utilizadas en aviones y turbinas. Esta figura alar con forma de gota está compuesta por cuatro zonas definidas en la figura 4.1.7 y que se mencionarán en la descripción, además de ser medido en su ángulo de ataque respecto al parámetro conocido como cuerda que atraviesa este perfil equilibrando su centro de masa como muestra la figura 4.1.8.

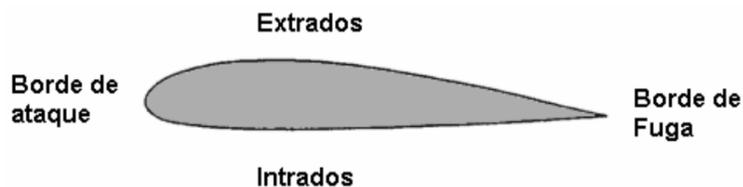


Figura 4.1.7. Partes de un perfil alar (Bernal y Orrego, 2007).

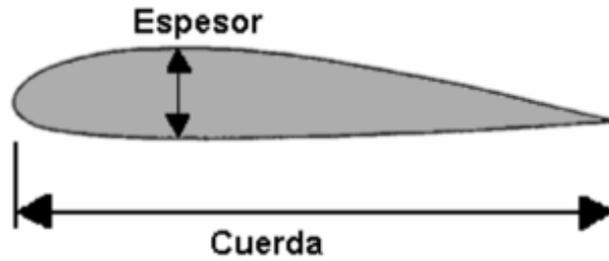


Figura 4.1.8. Cuerda de un perfil alar (Bernal y Orrego, 2007).

La modificación de este ángulo provocará un cambio en las fuerzas que inciden sobre el objeto, o séase, la sustentación y el arrastre. siendo esta última el efecto de resistencia aerodinámica detrás del cuerpo sometido al flujo (figura 4.1.9). Este arrastre o *drag* es causado por la fricción entre la superficie de las caras y el espacio de baja presión que queda detrás del mismo. Otro fenómeno, consecuencia del cambio en el ángulo de ataque, es que a partir de cierto grado la inclinación causa la aparición de flujo turbulento parásito que perturba el funcionamiento de las máquinas, es impredecible y limita la eficiencia de la turbina reduciendo la velocidad de desplazamiento de esta (figura 4.1.10).

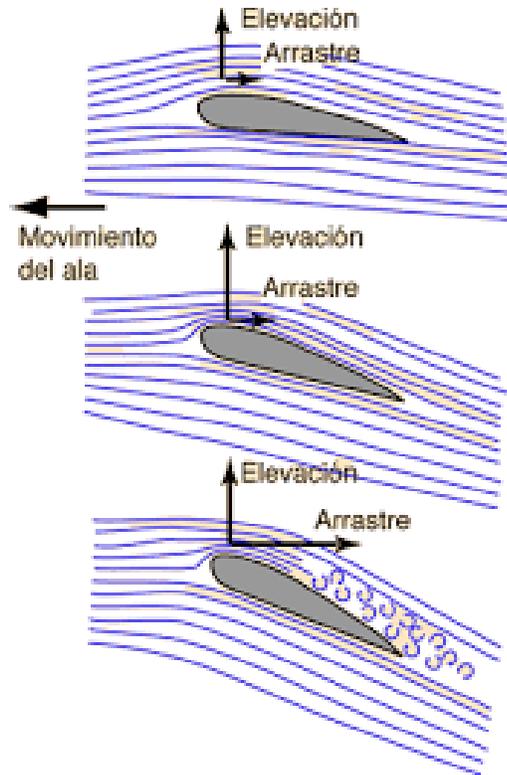


Figura 4.1.9. Sustentación y arrastre respecto al ángulo de ataque (FÍSICAMENTE HUMANO, 2013).

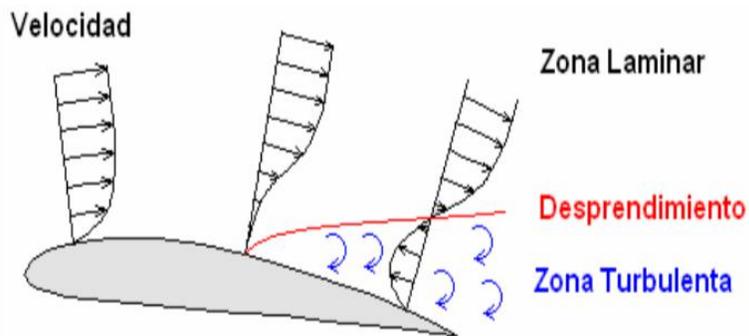


Figura 4.1.10. Flujo laminar y turbulento sobre un perfil alar (Bernal y Orrego, 2007)

Como las palas de un aerogenerador son un objeto en movimiento giratorio en sentido perpendicular al flujo de viento, estas crean un “viento falso” que no será más

que una masa de aire siendo atravesada por el perfil mientras este se mueve, de tal manera que el viento apreciado por la pala será la suma vectorial del viento real y el aparente y será este considerado como el flujo con el que trabaja como se muestra en la figura 4.1.11. Este fenómeno será similar en toda aplicación que base su propulsión en la fuerza de sustentación, pero tendrá cambios lógicos acorde al movimiento realizado, como en el caso de los aerogeneradores de eje vertical que sufrirán las fuerzas del viento real y el auto inducido de manera diferente (el auto inducido será siempre perpendicular y el real cambiará respecto a la posición de la pala).

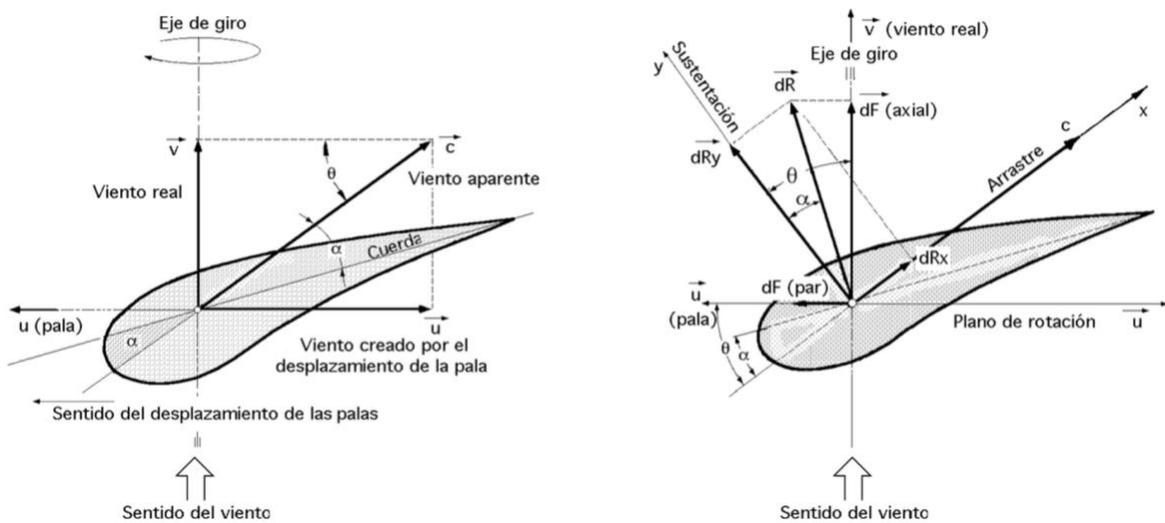


Figura 4.1.11. Velocidades y fuerzas en una pala de turbina (Rojas, s. f.).

De acuerdo con Bernal y Orrego (2007) el coeficiente de sustentación, el área barrida por el objeto contra el flujo y la fuerza de sustentación están relacionadas en la ecuación 4.1.10. Esta se trabaja de manera experimental con la variación en las formas del sólido, el ángulo de ataque y las condiciones del flujo como densidad y velocidad, además de que estos valores se obtienen como gráficos en función de las variables conocidas y alterables. En la fórmula L representa la fuerza de sustentación *lift*, ρ la densidad del viento, s el área transversal de la pala respecto al flujo y v la velocidad del fluido.

$$Cl = \frac{2L}{\rho s v^2} \quad (4.1.10)$$

Siguiendo la misma lógica, de manera experimental también se obtiene el coeficiente de arrastre del objeto dada la resistencia como se expresa en la ecuación 4.1.11. Donde d es la fuerza de arrastre *drag* y los demás valores son los mismos que para la sustentación.

$$C_d = \frac{2d}{\rho s v^2} \quad (4.1.11)$$

Sabiendo que los aerogeneradores tienen una forma circular y describen un movimiento angular, es necesario considerar que las palas necesitan tener una forma distinta según la distancia a la que cada sección se encuentra respecto del centro de giro, dado que la teoría anterior se entiende de manera lineal. Supongamos que el viento atraviesa el área barrida por el generador a la misma velocidad en cada punto (más adelante se verá que esto no es así), esto causaría que en una pala con el mismo diseño de área en una vista transversal del aspa causaría que la fuerza de sustentación no fuera la misma en todo punto, esto porque la velocidad lineal en cada punto está relacionada al diámetro al que esta sección se encuentra del centro de giro sobre el rotor como se muestra en la ecuación 4.1.12. Es por esto que el perfil de la pala se ve cambiado en forma, tamaño y ángulo de ataque conforme se avanza de la base a la punta con la intención de mantener una velocidad angular constante generada y reducir lo más posible las fuerzas internas del aspa que pueden implicar un daño estructural sobre el sólido.

$$v = \omega * r \quad (4.1.12)$$

Ya conociendo la teoría necesaria sobre el viento y la matemática detrás del funcionamiento de las palas de un aerogenerador es posible profundizar sobre la operación de los aerogeneradores, ciertas consideraciones extra y su relación con la meteorología.

Comenzando por comprender que el viento no es un fenómeno constante en el tiempo, con magnitud regular y dirección fija, los estudios necesarios para la instalación de un parque eólico incluyen un análisis de frecuencia y velocidad sobre una roza de los vientos que permita orientar el sentido de los molinos, el diseño para

las velocidades que se aprovecharán y un pronóstico para el control. Como se muestra en la figura 4.1.12, un análisis de este tipo permite a los desarrolladores pronosticar si el área estudiada es un lugar óptimo para la inversión y qué requisitos de funcionamiento se tendrán; generalmente buscando que el viento provenga en una marcada mayoría de la frecuencia desde la misma dirección y que la velocidad media sea suficiente para las necesidades de los aerogeneradores.

Otra cosa fundamental de estos estudios del viento es que las velocidades puntuales medidas en la zona no se desvíen demasiado de la velocidad media determinada, ya que de ser así implicará momentos de bajas velocidades inútiles para las aspas y tiempos de vientos muy rápidos no aptos para funcionar con seguridad. Lo que causará riesgo, así como el no funcionamiento del aerogenerador por seguridad. A estos valores se les conoce como velocidad de conexión que es el mínimo de velocidad requerido para generar energía y no verse afectado por las pérdidas (alrededor de diez kilómetros por hora o tres metros por segundo), la velocidad nominal siendo para la cual está diseñado el aerogenerador para funcionar en su potencia nominal y la velocidad de desconexión que implica el punto a partir el cual el rotor no puede funcionar de manera segura y deberá pararse con los frenos del mecanismo (alrededor de noventa kilómetros por hora o veinticinco metros por segundo).

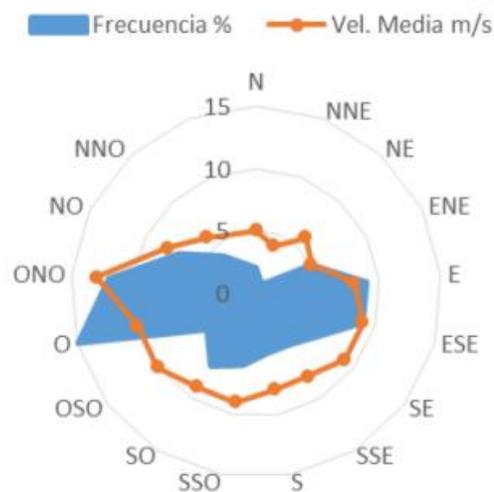


Figura 4.1.12. Rosa de los vientos de frecuencia y velocidad media del viento (Candel, 2014).

Además, para las instalaciones de aerogeneradores es fundamental analizar el entorno geográfico en el que nos encontramos. Tanto por fenómenos meteorológicos complejos derivados de la interacción entre corrientes de aire, presión, temperatura y relieve como montes o valles (mismos que son dignos de una teoría más compleja y de poco interés para el presente estudio, por lo que no se abordarán, pero mencionamos su existencia por posible interés del lector) así como la relación de la velocidad del viento y su calidad respecto a la altura de medición y el relieve de la superficie.

La relación entre la velocidad del viento, la altura y las condiciones de la superficie están dadas por la ley exponencial de Hellmann, meteorólogo europeo que a comienzos del siglo XX desarrolló una ecuación estadística para determinar la velocidad para cada altura respecto a la superficie según el medio. En la ecuación 4.1.13 se muestra cómo la velocidad del viento respecto a la altura v_h está dada por los valores de la velocidad a diez metros sobre la superficie v_{10} , la altura h y el coeficiente de fricción α .

$$v_h = v_{10} \left(\frac{h}{10} \right)^\alpha \quad (4.1.13)$$

Ya con esta fórmula experimental útil para determinar la altura del aerogenerador se requieren los valores de la tabla 4.1.1 donde se muestran los coeficientes para cada una de las posibles superficies como hielo, mantos acuíferos, planicies, zonas semi urbanizadas, bosques y ciudades.

| Tipo de Terreno | Valor del exponente de Hellmann |
|--------------------------------------|---------------------------------|
| Lugares llanos con hielo o hierva | $\alpha = 0.08 \div 0.12$ |
| Lugares llanos (mar, costa) | $\alpha = 0.14$ |
| Terrenos poco accidentados | $\alpha = 0.13 \div 0.16$ |
| Zonas turísticas | $\alpha = 0.2$ |
| Terrenos accidentados o bosques | $\alpha = 0.02 \div 0.26$ |
| Terrenos muy accidentados y ciudades | $\alpha = 0.25 \div 0.4$ |

Tabla 4.1.1. Coeficientes alfa para ley exponencial de Hellmann (Uribe, 2018).

Ya con esta información se obtienen los perfiles de velocidad de viento conforme a altura tal y cómo se muestra en la figura 4.1.13.

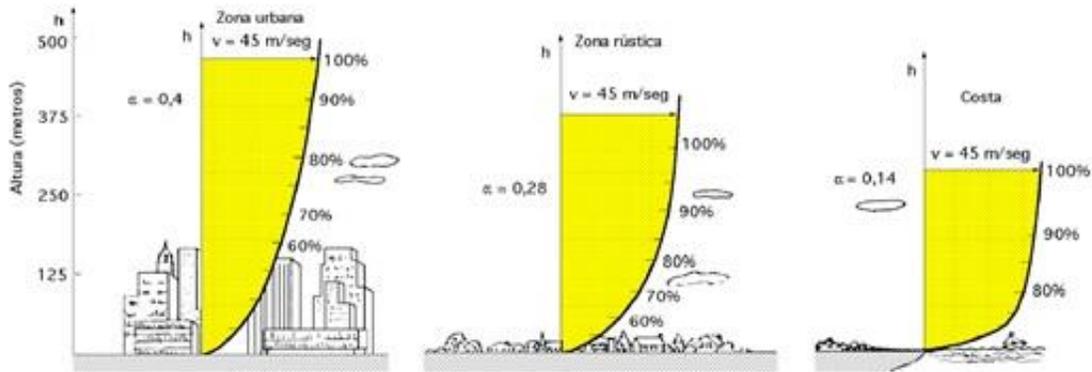


Figura 4.1.13. Perfil de velocidad de viento conforme altura y superficie, ley exponencial de Hellmann (Chust, 2018).

Por otro lado, la altura respecto al suelo junto con las condiciones meteorológicas y geográficas también afectan la calidad del flujo de aire dado que los aerogeneradores solo aprovechan flujos laminares y, por motivos de temperatura, irregularidad, fricción o, incluso, contaminantes, el viento forma patrones irregulares cerca del suelo reduciéndose conforme se aumenta la altura de medición hasta llegar a un comportamiento totalmente paralelo sobre una línea de referencia llamada capa límite de viento. La capa límite de viento puede ir desde algunos metros hasta kilómetros sobre la superficie dependiendo de las características antes mencionadas, la figura 4.1.14 ejemplifica el fenómeno, no puede ser siempre incluida como fundamental para un desarrollo de este tipo por sus requerimientos cambiantes y ser inalcanzable en algunos de los casos. Pero de ser posible la instalación, será con seguridad más eficiente y productiva.

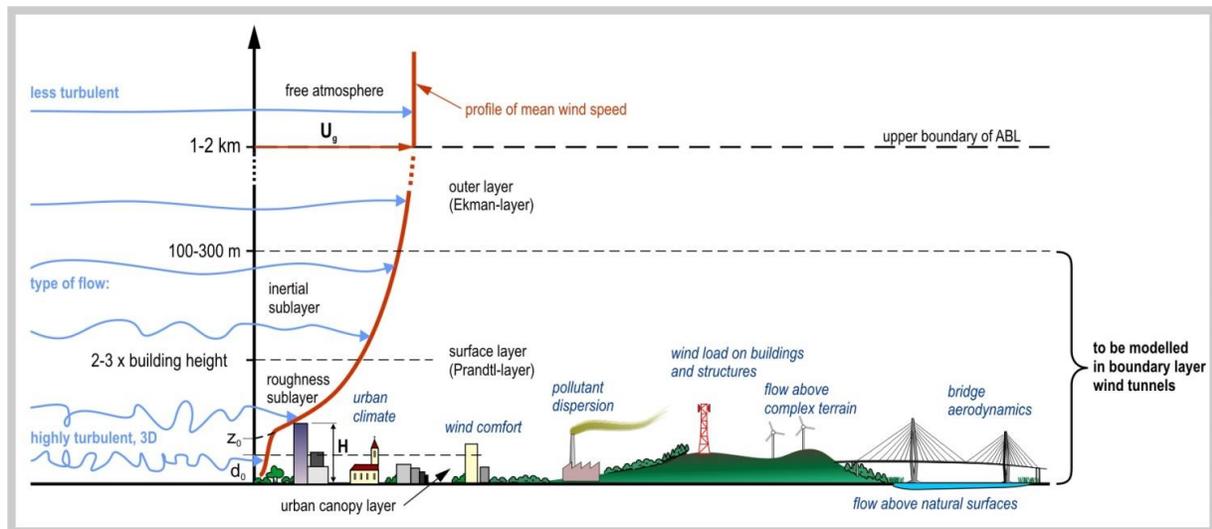


Figura 4.1.14. Capa límite de viento (Anónimo, 2016).

Estas dos son las razones por las que las turbinas eólicas son cada vez más altas. Retando así las capacidades de los materiales y las técnicas de instalación y mantenimiento con el fin de aumentar la producción eléctrica. También justifican el desarrollo de los parques eólicos de ultramar que mejoran las circunstancias mencionadas, además de, generalmente, captar vientos más veloces.

Para el diseño de los aerogeneradores, además de la altura y la forma de las palas como abordó anteriormente, es fundamental incluir la mecánica interna del rotor. Así como, también, la disposición de las palas y su función en la obtención de energía del viento.

Los aerogeneradores modernos tienen un diseño de tres palas de acuerdo con la ley de Betz, físico alemán que a finales de los 20's desarrolló una fórmula para estimar la eficiencia energética de un aerogenerador de acuerdo con la aerodinámica de estos dados y los principios de conservación de masa y momento. Como muestra la figura 4.1.15, los aerogeneradores encaran una sección de flujo dada por la forma del mismo (en este caso un tubo) que posteriormente incrementará su sección transversal dada la relación entre velocidad, presión y área. Como se explica en la figura 4.1.16, una masa de aire siempre constante se aproxima a las aspas del sistema y dada la obstrucción de estas la velocidad se reduce al pasar a través de esta parte

de la energía cinética que es cedida a la máquina, por lo que la velocidad se reduce aún más. Mientras que con la presión pasa algo similar, aumentando conforme se aproxima el flujo al modelo y posteriormente cayendo como si de una burbuja de vacío se tratara, dando en conjunto lugar a que esta masa de aire que en principio ocupaba un volumen determinado con una sección transversal de área igual a la descrita por el molino se vea aumentada, incrementando la sección como se mencionó antes.

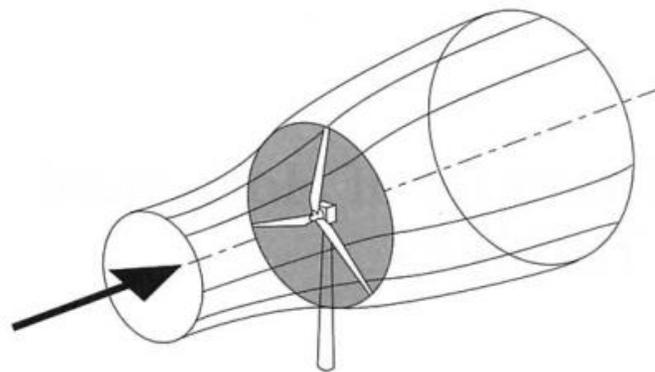


Figura 4.1.15. Flujo de aire a través de un aerogenerador (Da Silva & Salas, 2020).

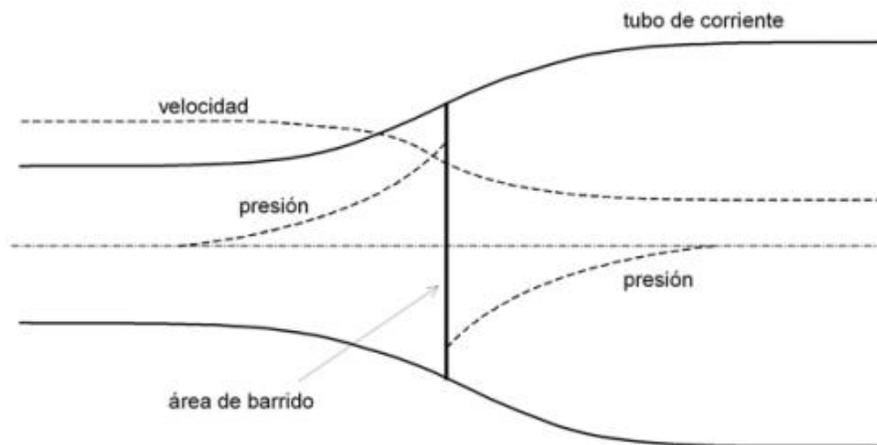


Figura 4.1.16. sección del flujo, velocidad y presión con masa constante (Mosca, 2019).

A partir de este análisis Betz concluyó (después de una desarrollada matemática que no se incluirá) que la eficiencia máxima para cualquier aerogenerador sería de dieciséis sobre veintisiete, cercano a cincuenta y nueve por ciento como límite teórico. Aunque, en la práctica este valor será menor. Para determinar la eficiencia de cada modelo se utiliza un coeficiente obtenido de la ecuación 4.1.14.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (4.1.14)$$

Estos coeficientes cambian dependiendo de cada tipo de generador y sus características particulares, la figura 4.1.17 muestra la eficiencia de algunos de los más comunes. Como puede apreciarse, los modelos de tres aspas tienen un mejor rendimiento que aquellos de menor cantidad y una mejor relación rendimiento costo que los modelos con mayor número, además de reducir la perturbación del viento permitiendo la instalación de parques completos en una menor superficie.

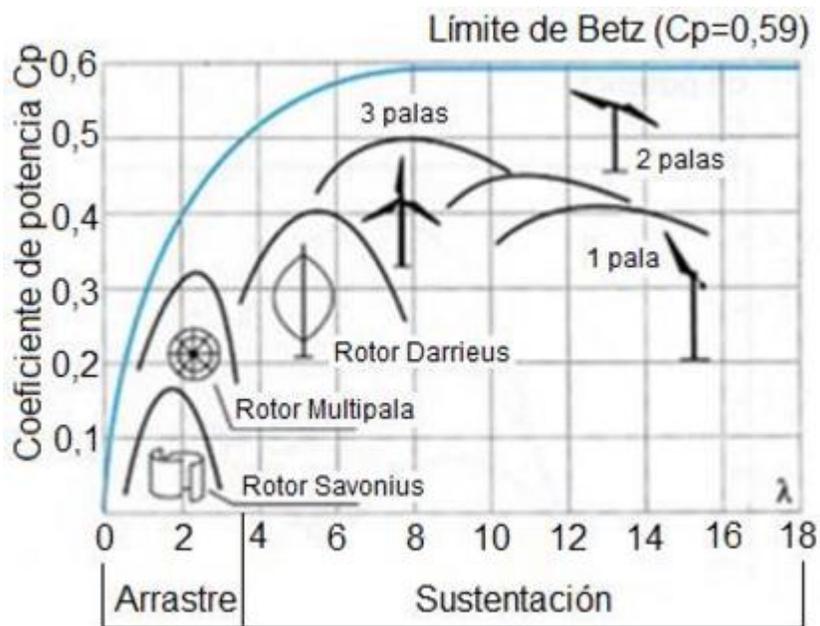


Figura 4.1.17. Coeficiente de potencia en función de la velocidad para distintos tipos de aerogeneradores (Funes, 2009).

Los modelos de aerogeneradores de eje horizontal modernos incluyen un sistema optimizado para el control y la producción que consta de un rotor que integra

las palas del sistema, el acoplamiento que comunica el rotor con la caja de engranes, una caja multiplicadora mecánica que aumenta las revoluciones de giro a la salida del sistema para finalmente conectarlo a un eje motriz que ingresa este movimiento al generador eléctrico y transmitirlo a la red eléctrica como se muestra en la figura 4.1.18. Esto con el afán de convertir el torque a la velocidad de entrada y aumentar esta velocidad de giro a una óptima para obtener una salida eléctrica alineada con los requerimientos de la red eléctrica (de entre dieciocho y veinticinco revoluciones por minuto a unas mil ochocientas por minuto).

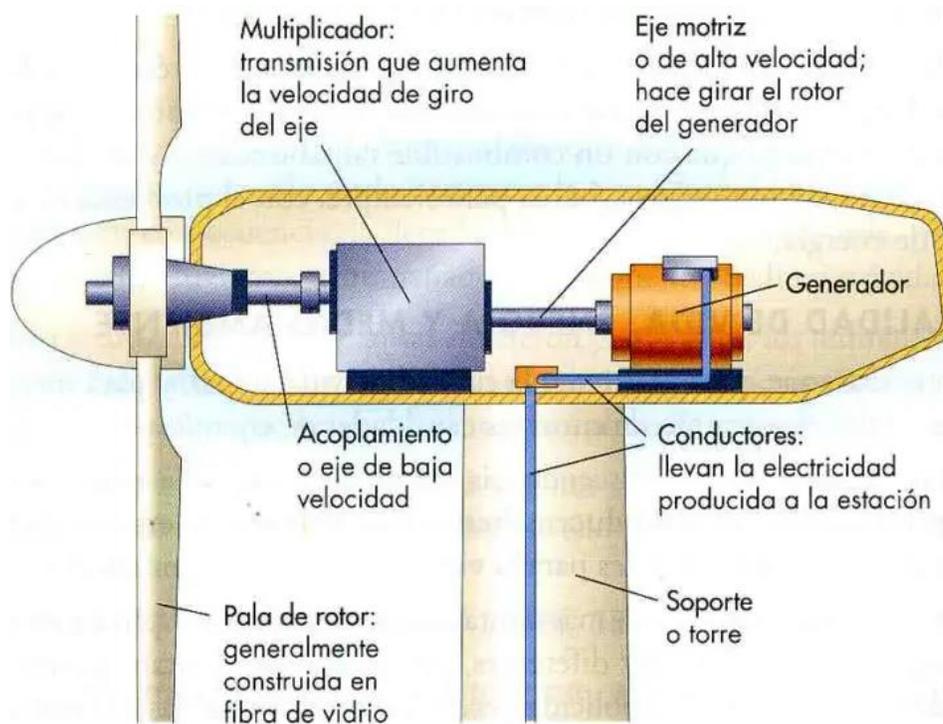


Figura 4.1.18. Componentes electromecánicos de una turbina eólica (Oviedo et al., 2016).

Algunos modelos pueden incluir control de la orientación del rotor para aprovechar los vientos que no provengan de la dirección determinada. Como más frecuente, ajuste de ángulo de ataque de las palas para mantener una rotación constante aun a diferentes velocidades de viento entre otros aditamentos con el objetivo de optimizar la producción y el mantenimiento aumentando la durabilidad y la producción y, con ello, las ganancias.

4.2.- Piezoeléctricos

El fenómeno piezoeléctrico como ya se mencionó a grandes rasgos en secciones anteriores de este documento es un efecto de algunos materiales que, dada la estructura en la que se ordenan sus átomos y moléculas internas, tienen la capacidad de transformar energía mecánica en eléctrica y eléctrica en mecánica. Por ello es por lo que se les denomina transductor.

Transductor es el nombre que reciben dispositivos con la capacidad de transformar un tipo de energía a otra en pequeñas escalas a comparación de generadores y transformadores como los usados en la industria eléctrica (figura 4.2.1). Los transductores son implementados en electrónica como sensores y actuadores que les permiten a los sistemas interactuar con el mundo físico de manera autónoma en sistemas de control (como se muestra en la imagen 4.2.2) y su estudio e implementación en el área técnica (no en el desarrollo científico) corresponde al campo de la instrumentación, con amplio uso en la era industrial y post industrial con el aumento de proyectos autónomos.

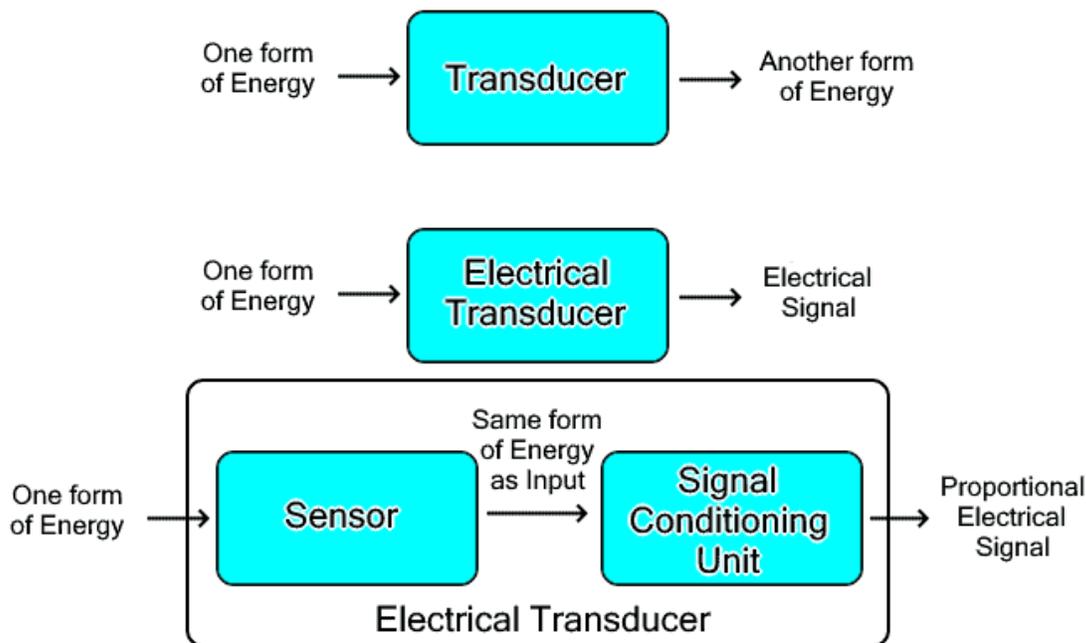


Figura 4.2.1. Transductores eléctricos y electrónicos comparación (Anónimo, 2022).

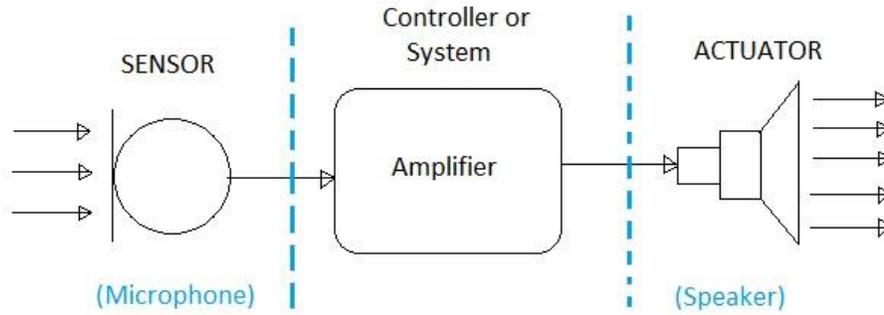


Figura 4.2.2. Transductores electrónicos sensores y actuadores (Computer Science at the Chinese International School, s. f.).

Estos transductores deben sus capacidades a propiedades fisicoquímicas que son aprovechadas por el dispositivo para una aplicación específica de medición o acción pueden ser ordenados tal como muestra la figura 4.2.3 (Martinkova, et al., 2017).

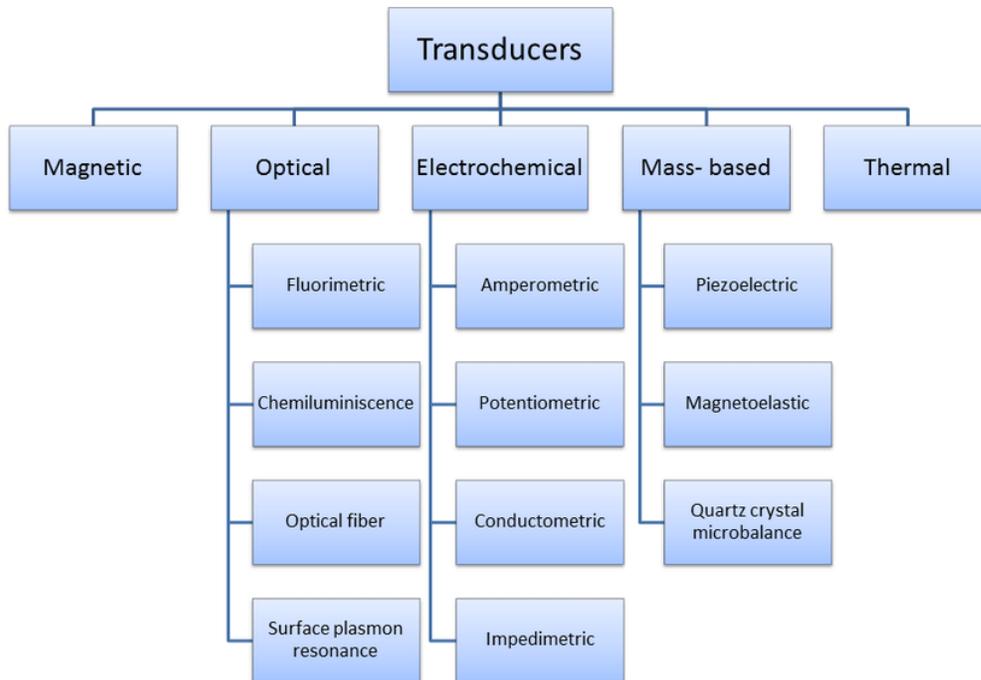


Figura 4.2.3. Orden de transductores según su propiedad de funcionamiento, (Martinkova, et al., 2017).

Estos también pueden ser discriminados según características técnicas de su funcionamiento ya implementado en un sistema electrónico (por lo que este método solo incluye las que tienen entrada o salida del proceso una señal eléctrica). La figura 4.2.4 muestra estas posibles líneas para distinguir los transductores según múltiples criterios: propiedad eléctrica utilizada, proceso del dispositivo, potencia utilizada, tipo de salida generada o aplicación.

Dentro de las propiedades eléctricas se incluyen la resistividad, capacitancia y la inductancia. Las tres básicas para los circuitos eléctricos y que pueden relacionarse a varias propiedades que les permitan reaccionar a estímulos físicos como la fotorresistencia que cambia su valor de acuerdo con la presencia de luz. Los piezoeléctricos que integran un material piezoeléctrico entre dos placas capacitivas o el uso de bobinas inductivas como sensor de campo magnético.

Cuando se cataloga según el proceso del dispositivo existen dos etapas, primaria y secundaria. La etapa primaria convierte magnitudes físicas en mecánicas que puedan aprovecharse en la segunda etapa, siendo esta la encargada de transformar la mecánica en una señal eléctrica.

La potencia utilizada se refiere al origen de la energía que utilizan los dispositivos transductores para transmitir las señales generadas, pudiendo alimentarse de manera externa para los pasivos como una galga extensiométrica o funcionar por generación eléctrica propia como los piezoeléctricos. El tipo de salida de un transductor en electrónica puede ser una señal analógica continua y con valores varios o digital transmitiendo un muestreo de valores con valores de la misma magnitud (siendo estos muy poco comunes).

Finalmente, la aplicación hace referencia a la manera en la que el dispositivo transductor opera para permitir que el sistema electrónico interactúe con el mundo. Si como sensor recibiendo estímulos físicos y convirtiéndolos en algún tipo de señal procesable por cerebro o como actuador que toma las instrucciones enviadas desde el control para realizar algún tipo de fenómeno físico perceptible por humanos u otras máquinas.

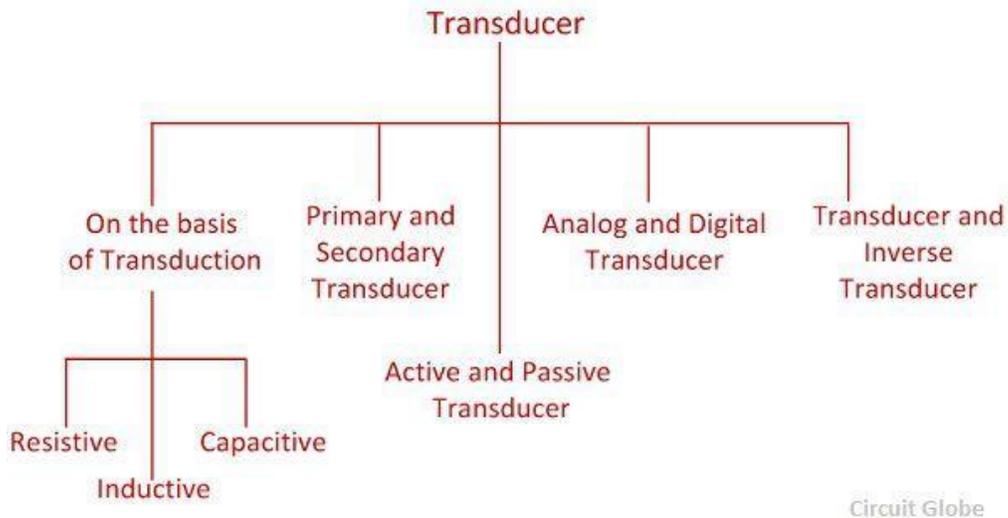


Figura 4.2.4. Categorías de transductores electrónicos (UNIGAL, 2022).

De esta manera, como transductores, los dispositivos compuestos por materiales con propiedades piezoeléctricas se pueden entender como transformadores eléctricos y electrónicos por funcionar en ambas aplicaciones, sensores y actuadores por funcionar en ambas vías basados en una propiedad electromecánica de los materiales, con un modelo capacitivo, de tipo secundario que funciona de manera activa, generando señales análogas y que puede, como ya se mencionó antes, funcionar de manera directa o inversa.

Si ampliamos aún más el análisis de las propiedades de los materiales fuera de sus aplicaciones en eléctrica y electrónica, los materiales piezoeléctricos según Malmcrona (2018) también son considerados como uno de los *multifunctional materials* o *smart materials* que en español se interpretaría como «materiales multifuncionales» o «materiales inteligentes». Entendiendo esto como materiales que al sufrir una perturbación física desarrollaran una clara y fuerte respuesta física de algún otro tipo como proceso transformador (nuevamente). En la tabla 4.2.1 se muestra en las intersecciones de las columnas y filas estas propiedades de los materiales inteligentes, en la diagonal oscura los materiales comunes y en las casillas amarillas la ubicación de los piezoeléctricos.

| OUTPUT INPUT | DEFORMACIÓN | CARGA ELÉCTRICA | FLUJO MAGNÉTICO | TEMPERATURA | LUZ |
|-----------------|-------------------|--------------------------|------------------|------------------|-----------------------|
| TENSIÓN | ELASTICIDAD | PIEZOELECTRICIDAD | MAGNETOSTRICCION | | FOTOELASTICIDAD |
| CAMPO ELÉCTRICO | PIEZOELECTRICIDAD | PERMITIVIDAD | | | EFFECTO ELECTROOPTICO |
| CAMPO MAGNÉTICO | MAGNETOSTRICCION | EFFECTO MAGNETOELÉCTRICO | PERMEABILIDAD | | MAGNETOÓPTICO |
| CALOR | EXPANSION TÉRMICA | PIROELECTRICIDAD | | CALOR ESPECÍFICO | |
| LUZ | FOTOSTRICCION | EFFECTO FOTOVOLTAICO | | | REFRACCION |

Tabla 4.2.1. Materiales inteligentes (Malmcrona, 2018).

Cuando sea mencionado que la piezoelectricidad es un fenómeno bidireccional, se infiere que un dispositivo transductor al que se le aplique una fuerza mecánica sufrirá una deformación y, como consecuencia, provocará un campo eléctrico, generando una diferencia de potencial y corriente eléctrica. Mientras que, en el otro extremo, si a un transductor piezoeléctrico se le aplica un campo eléctrico con un voltaje sobre su superficie, este pretenderá cambiar su forma causando un movimiento. Estos dos procesos se ilustran en la figura 4.2.5. A estos procesos piezoeléctricos se les denomina directo e inverso, directo cuando un suceso mecánico causa un fenómeno eléctrico e inverso cuando es la electricidad la que detona el movimiento físico.

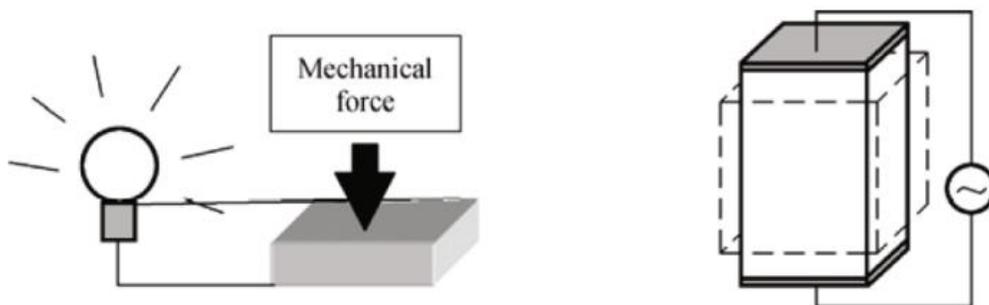


Figura 4.2.5. Fenómeno transductor piezoeléctrico bidireccional (Malmcrona, 2018).

El fenómeno piezoeléctrico también tiene como característica el ser reversible, lo que implica que si en el proceso directo la fuerza mecánica se retira el material regresará a su forma original y el campo eléctrico precursor de la salida de voltaje y corriente también desaparecerá. Mientras que en su aplicación inversa al momento de retirar la carga eléctrica de la superficie del transductor este revertirá su deformación.

El efecto piezoeléctrico también muestra variaciones de acuerdo con el tipo de fuerza mecánica utilizada o la polaridad eléctrica aplicada. Para desarrollar esta idea se abordará una explicación sobre las fuerzas que se pueden aplicar a los sólidos y las implicaciones de la polaridad eléctrica.

Las fuerzas aplicables a los sólidos implican las distintas maneras en las que una fuerza o más de una fuerza pueden ser aplicadas sobre un objeto, y, dependiendo de sus condiciones y características particulares, el efecto sobre la pieza causará un comportamiento determinado. Por esto, el estudio de cada uno de estos utiliza física y matemáticas distintas. Como se muestra en la figura 4.2.6, la lista de estos posibles esfuerzos, nombre con el que se le conoce a las fuerzas aplicadas sobre sólidos en mecánica de sólidos, según su interacción.

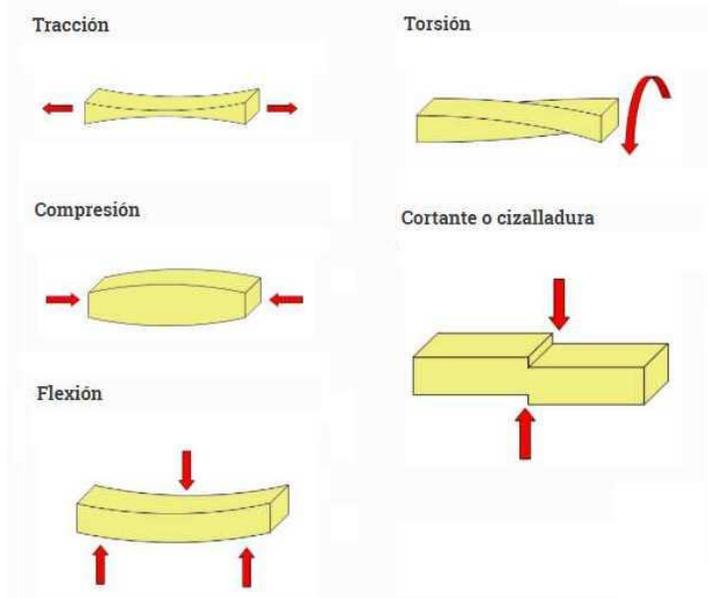


Figura 4.2.6. Esfuerzos en mecánica de sólidos (Maturana, s. f.).

Como ejemplifica la misma imagen 4.2.6, la tracción refiere a dos fuerzas aplicadas en lados opuestos del objeto que se aplican de manera excéntrica. Esto causa que se elongue, mientras que la compresión sería el recíproco del esfuerzo anterior, aplicando las fuerzas sobre lados contrarios, pero de manera intrínseca, aplastando la pieza.

La flexión es un esfuerzo aplicado en sentidos opuestos al objeto sobre líneas de acción no paralelas, lo que causa que este se arquee respecto a su diseño original. Por otra parte, la torsión aplica una fuerza rotacional sobre una sección del objeto mientras otra fuerza se aplica en otra zona, provocando que este termine por enroscar deformándose respecto al original.

Finalmente, el esfuerzo cortante siendo el más específico de los tres. Este se dispone de manera muy similar a la tensión y la compresión, con fuerzas en extremos contrarios con una dirección intrínseca o extrínseca. Con la diferencia de que la línea de acción está muy ligeramente desplazada la una de la otra, encontrándose en paralelo que esta acción causa la separación del objeto en una línea paralela encontrada entre los vectores aplicados.

Las tensiones eléctricas son un fenómeno de la electricidad provocado por un desbalance de cargas entre dos secciones. Por ser un básico de la eléctrica no se abordará a profundidad este concepto de diferencia de potenciales, pero, como una descripción general, se entiende que cuando las cargas eléctricas de los átomos se alteran, desplazando parte de los electrones negativos a un punto, este mostrará una carga negativa, mientras que la zona afectada con falta de estas partículas y por ende unos átomos con mayor número de protones positivos, tendrá una carga positiva. Con las diferencias de partículas provocadas anteriormente, los electrones procurarán volver a aquellos huecos en sus átomos de origen provocando una fuerza que promueve el movimiento de estas subatómicas, siendo que el sentido del desplazamiento de cargas determinará la polaridad mencionada anteriormente.

Estos conceptos son importantes dado que están estrechamente relacionados en el fenómeno piezoeléctrico, siendo que el tipo de esfuerzo aplicado causará un

voltaje con una polaridad determinada o en el comportamiento contrario como muestra la figura 4.2.7. Esto quiere decir que, de aplicarse una fuerza a tensión, se generará un voltaje determinado sobre la superficie del objeto de manera tangencial a la línea de trabajo del esfuerzo, mientras que, si se cambia a un modelo a compresión la pieza tendrá las mismas cargas, pero en la superficie contraria al caso anterior. La otra vía de funcionamiento implica que, de aplicarse una diferencia de potencial sobre superficies contrarias del material, este se deformará alargándose, mientras que cambiar la polaridad causaría que el material se vea aplastado.

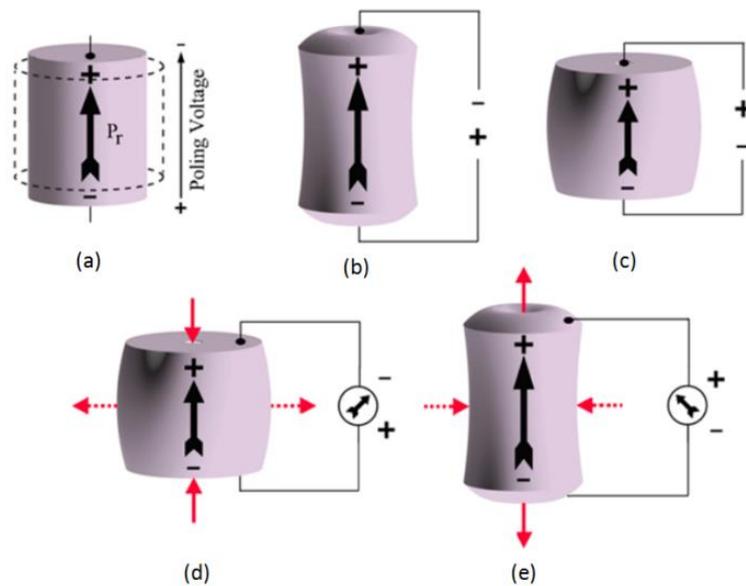


Figura 4.2.7. Comportamiento de piezoeléctricos a tensión, compresión o dependiendo la polaridad del voltaje aplicado (Malmcrona, 2018).

Por último, para terminar de precisar cómo es que este fenómeno actúa en concepto en el estudio físico macroscópico se debe decir que los esfuerzos ocasionan diferencias de potencial en todas las caras de la pieza. Sin embargo, en proporciones distintas y que otros tipos de esfuerzo como la flexión, por su comportamiento interno en el objeto, también provocan desplazamiento de cargas sobre las superficies de los objetos.

Todos los esfuerzos provocan diferencias de potencial proporcionales a la magnitud de las fuerzas aplicadas (dado que a mayor fuerza mayor deformación) y a la inversa, una tensión mayor causará un mayor grado de deformación.

Para entender a detalle el efecto piezoeléctrico es necesario indagar en la física que lo causa, localizada en la estructura interna de estos materiales y sus cargas que se verán desbalanceadas durante el fenómeno.

Los primeros materiales piezoeléctricos descubiertos en la naturaleza y desarrollados en condiciones de laboratorio tenían como común denominador su estructura cristalina con arreglos moleculares geométricos no simétricos, provocando desbalances en las cargas internas del material. Se dará una breve descripción de la estructura cristalina y sus implicaciones en los materiales.

Los materiales en su estado sólido reducen la energía y por ende el movimiento de sus partículas constituyentes. Dando lugar a un volumen tridimensional estable que es conformado por múltiples posibles fuerzas de unión como covalente, iónico y metálico para los átomos y de ion-dipolo, Van der Waals (por dipolo-dipolo, dipolo inducido y fuerzas de dispersión de London) y puente de hidrógeno para las moléculas. En este proceso de organización, según las características del material y el proceso de creación, los materiales pueden formarse en una estructura interna ordenada que nombramos cristales presentes en cerámicos, metales o de manera desordenada llamada vítrea o amorfa. Los polímeros, por ser mencionados, son estructuras enredadas de cadenas atómicas largas que forman un sólido, pero no son cristalinos.

Los cristales, la estructura de mayor importancia para la piezoelectricidad por ser la organización más común para estos materiales transductores, forman celdas repetitivas y sumamente ordenadas de partículas que permiten mantener un bajo nivel de energía y reducir el espacio desocupado (factor de empaquetamiento) en el material dando lugar a un sistema compacto. Estas células pueden tomar catorce arreglos distintos ya establecidos por la ciencia de materiales (Hinojosa, 2000) que son mostrados en la figura 4.2.8 conocidas como redes de Bravais y mostrarán la manera

en la que los componentes químicos del material, dada alguna de las fuerzas antes mencionadas, se unirán en grandes granos cristalinos.

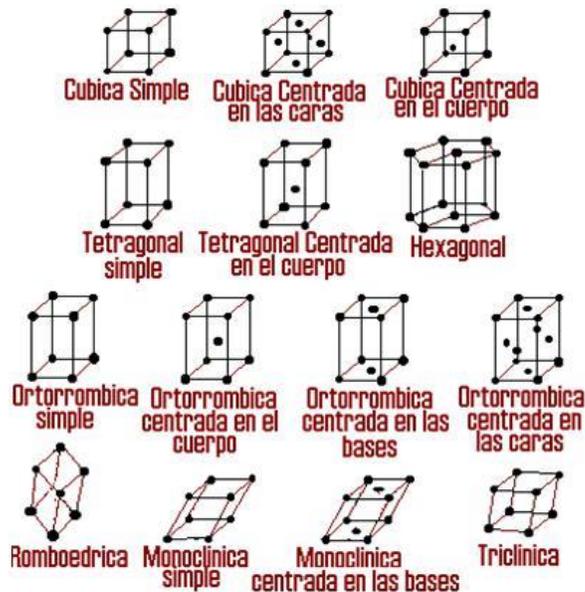


Figura 4.2.8. Redes de Bravais (Ferrán, s. f.).

Estos posibles arreglos tienen algunos parámetros llamados «parámetros de red» que mencionan para determinar su forma y características al analizar la celda unitaria. Comenzando por contar con tres longitudes a , b y c para las dimensiones de cada arista, medidas en nanómetros o Angstroms (un nanómetro es igual Angstroms e igual a uno por diez a la menos nueve metros) en los ejes x , y y z del espacio tridimensional, además de tres ángulos α , β y γ para las medidas formadas entre las aristas antes mencionadas, la figura 4.2.9 muestra esta información y sus relaciones (Askeland y Wright, 2004).

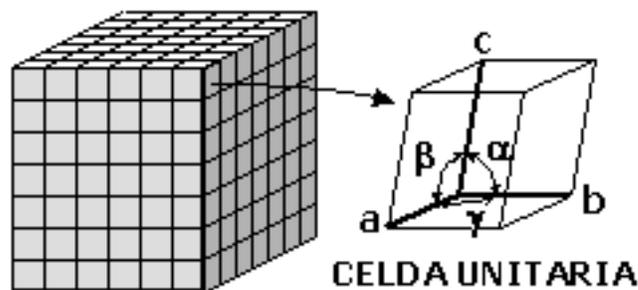


Figura 4.2.9. Celda unitaria y medidas longitudinales y angulares (Wikipedia, 2023).

Además de la geometría, las celdas unitarias cuentan con información relacionada a los átomos integrados en la estructura como la relación entre la arista con el radio atómico de acuerdo con la red de Bravais formada y en función de los átomos que componen el sistema (Askeland y Wright, 2004), véase figura 4.2.10.

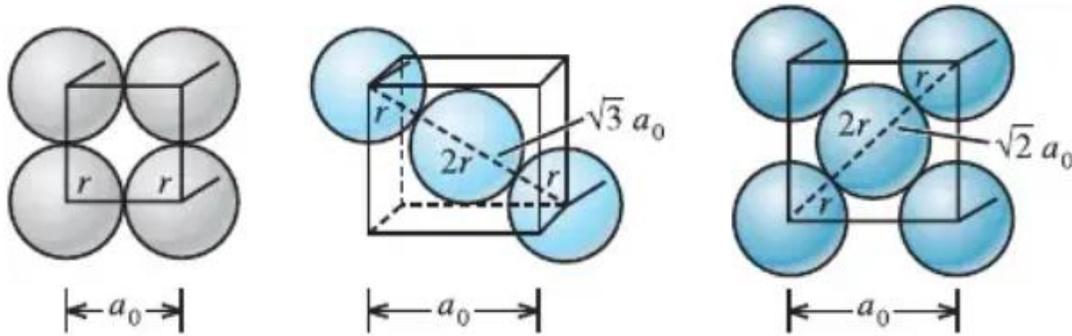


Figura 4.2.10. Relación arista-radio atómico (Askeland y Wright, 2004).

El número de átomos dentro de la celda unitaria de acuerdo con la red de Bravais formada y qué fracción de cada nodo atómico de esta se encuentra dentro de la geometría (Askeland y Wright, 2004). Siendo que el resto de la partícula se encuentra compartida con otro sistema (igual a este), como muestra de manera gráfica la figura 4.2.11.

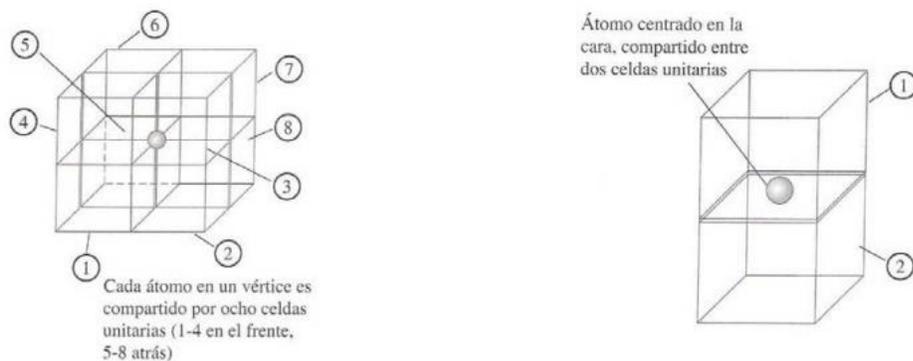


Figura 4.2.11. número de átomos dentro de una celda según localización (Altamirano, s. f.).

El número de coordinación es la cantidad de átomos que se encuentran en relativo contacto con la partícula que se está analizando en el sistema. Por lo que se entienden como los elementos próximos y dependerá nuevamente de la red de Bravais (Askeland y Wright, 2004). En la figura 4.2.12 se muestra un ejemplo de esto.

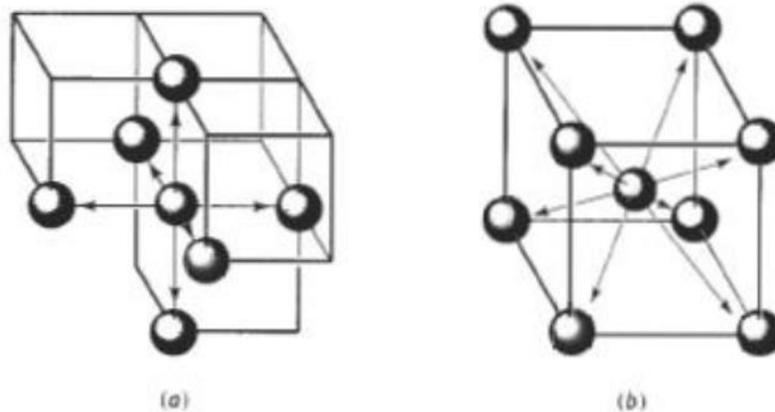


Figura 4.2.12. Número de coordinación (Aguilar, s. f.).

El factor de empaquetamiento implicará el porcentaje de espacio ocupado por los átomos vistos como esferas completas dentro de el volumen comprendido por la geometría de las aristas antes mencionadas y se calcula mediante la fórmula mostrada por la ecuación 4.2.1 (Askeland y Wright, 2004).

$$\text{factor de empaquetamiento} = \frac{\text{cantidad de átomos por celda} \cdot \text{volumen del átomo}}{\text{volumen de la celda unitaria}} \quad (4.2.1)$$

Finalmente, se puede calcular la densidad de las celdas relacionando el volumen de las celdas y el peso atómico de las partículas en los átomos dentro de la celda y el número de Avogadro (Askeland y Wright, 2004). La ecuación 4.2.2 muestra la función para calcular este valor dependiente de n del número de átomos en la celda, A el peso atómico de estas partículas, V_c el volumen de la unidad de celda unitaria y N_A el número de Avogadro.

$$\rho = \frac{nA}{V_c N_A} \quad (4.2.2)$$

Para estos análisis y cálculos es importante precisar que estas estructuras se formarán de átomos de distintos elementos químicos, por lo que los parámetros cambiarán en cada caso. Además, ningún material se puede entender como completamente puro o perfecto (Hinojosa, 2000), por lo que la presencia de átomos o partículas enteras incrustadas, faltantes de material, desorganizaciones o cambio de partículas por otras dentro del cristal afectará el rendimiento ideal en sus cualidades físicas incluyendo la propia estructura del material como muestra la figura 4.2.13.

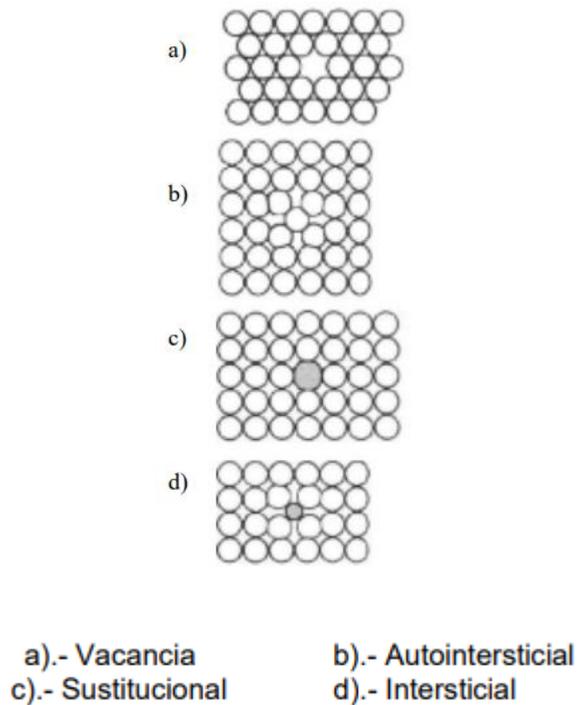


Figura 4.2.13. Impurezas y defectos de la estructura cristalina (Hinojosa, 2000)

También se dan deformaciones dentro de la repetitividad de la estructura por fallas causadas por algún tipo de esfuerzo, que dan lugar a dislocaciones, desordenando el sistema simétrico (Hinojosa, 2000) como se ve en la figura 4.2.14.

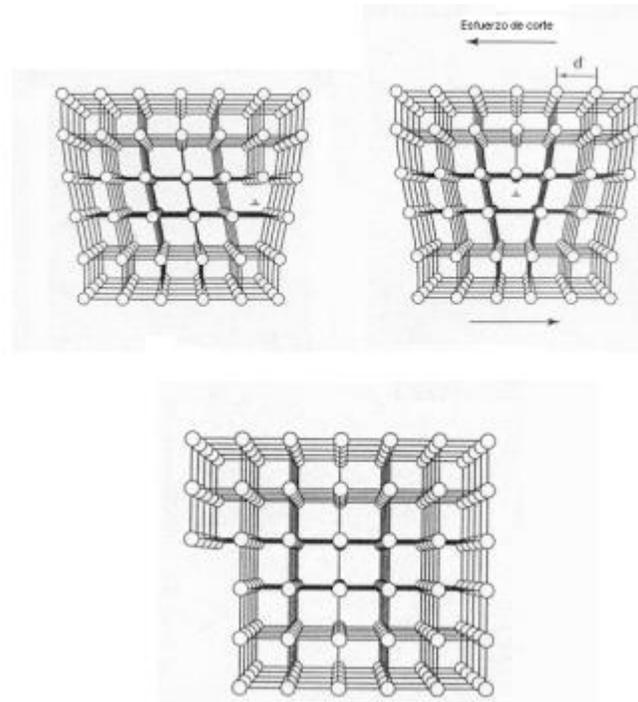


Figura 4.2.14. Dislocaciones de los cristales (Hinojosa, 2000).

Finalmente es preciso mencionar que en la organización cristalina rara vez se encuentran piezas de material integradas únicamente de un mosaico de celdas unitarias conocidos como monocristalinos. Por el contrario, los materiales comúnmente están formados por “granos” de cristales simétricos con las propiedades previamente mencionados y que se unen para dar lugar a un objeto completo llamados policristalinos. La figura 4.2.15 muestra cómo estaría constituido un material monocristalino (a), uno policristalino (b) y uno amorfo (c).

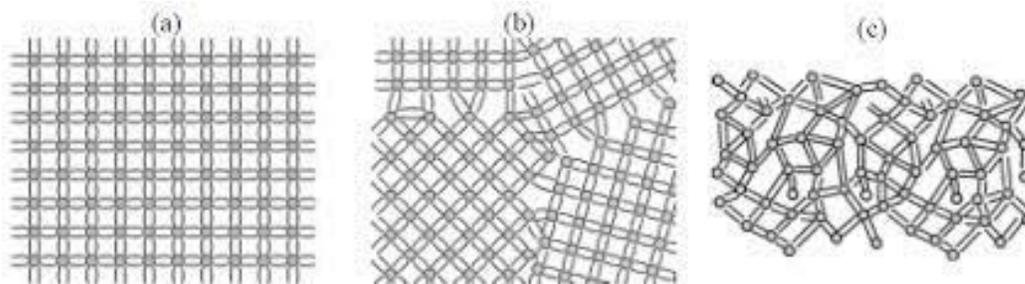


Figura 4.2.15. Constitución de los arreglos monocristalinos, policristalinos y amorfos (Cruz, 2012).

Entonces, con todo este conocimiento sobre la estructura interna de los materiales propia de la ciencia e ingeniería de materiales es posible explicar el fenómeno a microescala que da lugar (comúnmente pero no exclusivamente) a la piezoelectricidad.

Los materiales en condiciones normales se encuentran estables eléctricamente hablando. Lo que significa que las cargas atómicas y moleculares internas están de alguna manera neutralizadas con cargas inversas en la misma proporción. El fenómeno piezoeléctrico tiene aquí su comportamiento a nivel microscópico dado que, de tener un modelo estable con cargas distribuidas de manera organizada y equitativa respecto al centro de masa de las demás partículas hasta que por la aplicación de una fuerza esta geometría ordenada, se ve deformada dando lugar a un desbalance de cargas como se muestra en la figura 4.2.16 (Malmcrona, 2018).

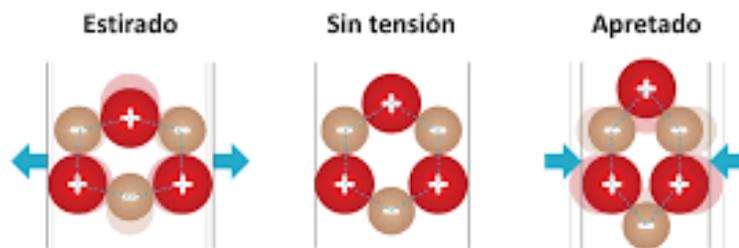


Figura 4.2.16. Perspectiva microscópica del efecto piezoeléctrico (Colegio Universitario de las Américas, s. f.).

Y este fenómeno se da de manera repetitiva sobre todas las estructuras del material. Por lo que los dipolos generados son múltiples y su efecto eléctrico se ve incrementado por la suma de cada una de estas pequeñas deformaciones como se muestra en la imagen 4.2.17, siendo que este fenómeno es como ya se ha mencionado antes, directo (a) e inverso (b).

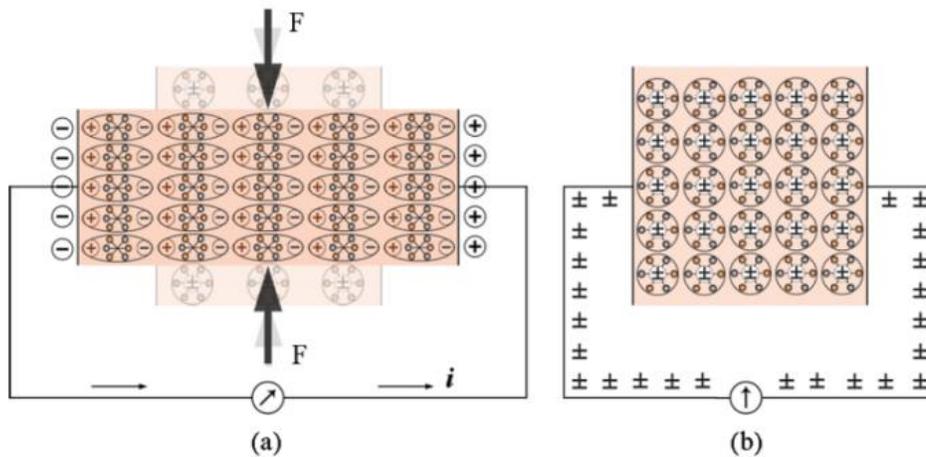


Figura 4.2.17. Sólido con efecto piezoeléctrico suma de dipolos (Malmcrona, 2018).

Como ejemplo de esto se puede revisar el comportamiento de los materiales con forma de perovskita, nombre que reciben los minerales con formas similares el titanato de bario por el científico ruso Lev Perovski descubierta en 1839. Como se muestra en la figura 4.2.18, esta cuenta con un átomo al centro de la celda unitaria que al momento de sufrir un esfuerzo se ve desplazado alterando la estabilidad de las cargas eléctricas.

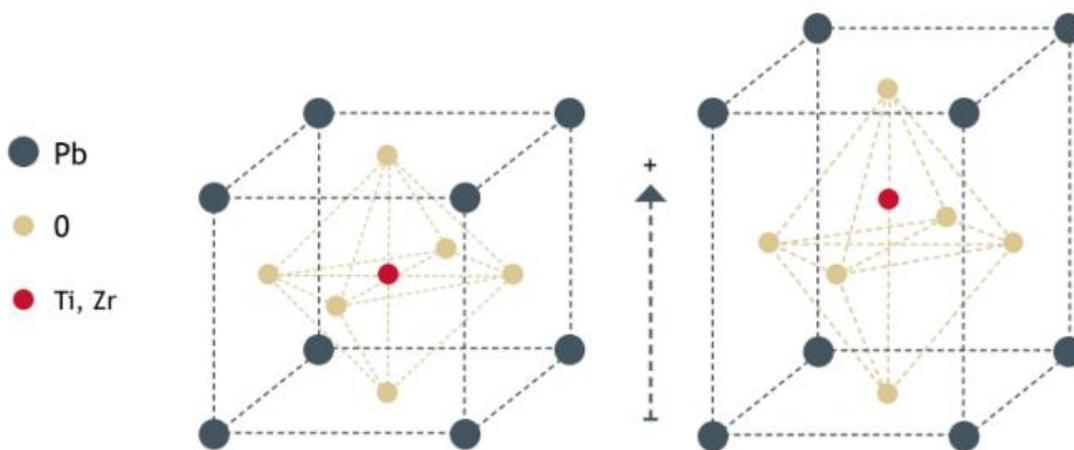


Figura 4.2.18. Perovskita de PZT y su deformación atómica (Malmcrona, 2018).

En la naturaleza se encuentran materiales como el cuarzo, sal de Rochelle, turmalina o topacio que tienen este efecto, pero con bajos rendimientos. Mientras que en condiciones de laboratorio se han creado materiales como el PZT o titanato-zirconato de plomo, Titanato de bario, óxido de zinc o el polímero de fluoruro de polivinilideno o PVDF. Los materiales de laboratorio se manufacturan creando primero el material y al momento de la formación de la pieza aplicando un campo que alinea las estructuras cristalinas para responder de la manera esperada al esfuerzo aplicado o viceversa como se muestra en la figura 4.2.19.

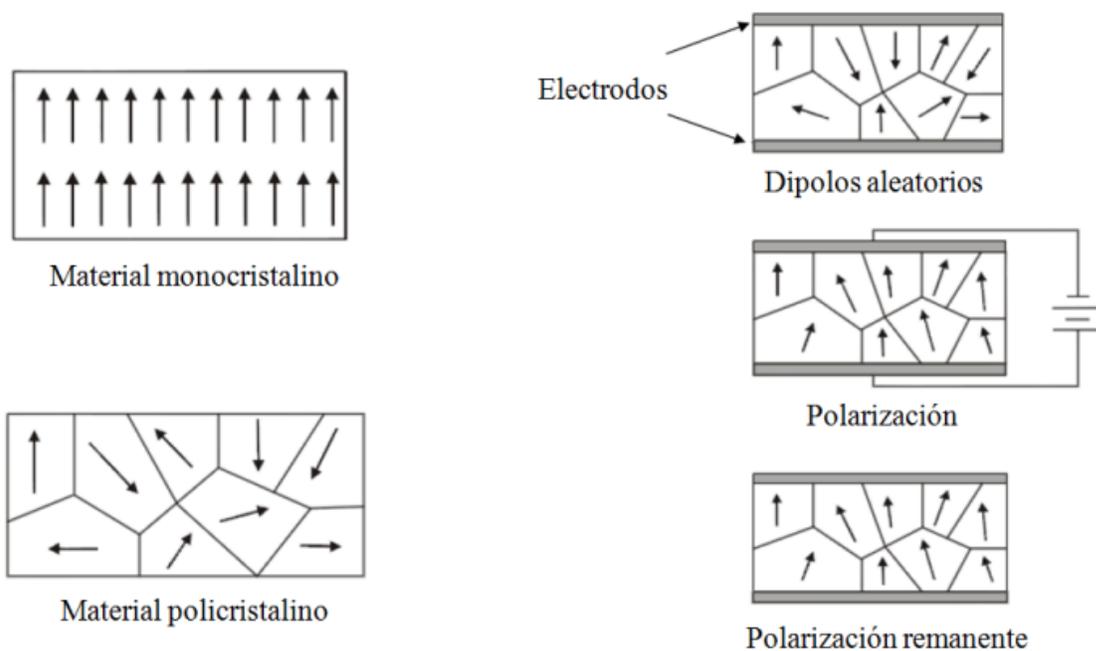


Figura 4.2.19. Fabricación de piezoeléctricos sintéticos (Malmcrona, 2018).

Derivado de este proceso, la polarización de los piezoeléctricos se ve vulnerable a altas temperaturas. Siendo que, si se sobrepasan las unidades estandarizadas para estos materiales dadas por el fabricante, la polarización se perderá y dejarán de funcionar en respuesta de fuerzas o tensiones eléctricas, a este valor se le conoce como temperatura de Curie (Gómez, 2018).

Por otra parte, los piezoeléctricos se despliegan como si de un capacitor se tratara, donde la capacitancia es la capacidad de almacenar carga sin que esta

atraviase el espacio entre las placas del dispositivo como muestra la ecuación 4.2.3 (Córdoba, 2013), donde C es la capacitancia, v la tensión y Q la carga (Córdoba, 2013).

$$C = \frac{dQ}{dV} \rightarrow Q = C \cdot V \quad (4.2.3)$$

Entonces, en el momento en el que se forma un capacitor la permitividad eléctrica, se ve relacionada con el área superficial del sistema y la distancia entre estas dos superficies que generan un campo eléctrico como muestra la ecuación 4.2.4 (en el vacío) donde A es el área, d la distancia, ϵ la permitividad y C la capacitancia (Córdoba, 2013).

$$C = \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d} \quad (4.2.4)$$

Esta ecuación cambiará en los casos donde existe un material dieléctrico entre las superficies que forman el capacitor como es el caso de un dispositivo piezoeléctrico, donde la permitividad del medio cambiará a la de dicho material como en la ecuación 4.2.5.

$$C = \epsilon \cdot \frac{A}{d} \quad (4.2.5)$$

Según Córdoba (2013) la relación entre la permitividad del material y la del vacío está medida en la constante dieléctrica k que se muestra en la ecuación 4.2.6.

$$k = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (4.2.6)$$

Como antes se ha mencionado, la propiedad piezoeléctrica tiene una respuesta lineal. Por lo que, en estado de sensor, un voltaje será generado en función de una fuerza respecto a una constante. Y, en el proceso inverso, una deformación se dará producto de la aplicación de una diferencia de potencial multiplicado por un valor constante. Las ecuaciones 4.2.7 y 4.2.8 muestran matemáticamente estos modelos, donde P es el vector de polarización piezoeléctrico, d es la constante de carga piezoeléctrica, T la tensión aplicada, S la deformación y E el campo eléctrico aplicado (Gómez, 2018).

$$P = dT \quad (4.2.7)$$

$$S = dE \quad (4.2.8)$$

Otra alternativa matemática para entender el efecto inverso es la ecuación 4.2.9 donde g es la constante de carga piezoeléctrica y D es el desplazamiento eléctrico.

$$S = gD \quad (4.2.9)$$

De tal manera que, retomando las ecuaciones 4.2.7 del efecto aplicado como sensor, esta puede desarrollarse en función del campo eléctrico y del desplazamiento eléctrico (flujo con el que el campo eléctrico puede atravesar el material dieléctrico) como se muestra en la ecuación 4.2.10, donde D será el desplazamiento eléctrico y E el campo eléctrico (Malmcrona, 2018).

$$P = D - \varepsilon E \quad (4.2.10)$$

Mezclando las ecuaciones 4.2.7 y 4.2.10 es posible desarrollar la ecuación 4.2.11, donde se despejará el desplazamiento eléctrico y se sustituirá el vector de polarización por su relación con la tensión y la constante de carga piezoeléctrica.

$$D = dT + \varepsilon E \quad (4.2.11)$$

También es posible tomar estas ecuaciones y crear la nueva ecuación 4.2.12 para obtener el campo eléctrico, donde aparecerá la constante g que como en la ecuación 4.2.13 se puede ver, es una relación entre la permitividad del material y la constante de carga piezoeléctrica.

$$E = -gT + \frac{D}{\varepsilon} \quad (4.2.12)$$

$$g = \frac{d}{\varepsilon} \quad (4.2.13)$$

Con el valor de la constante g es posible retomar el funcionamiento como actuador de la ecuación 4.2.8 y desarrollar la ecuación 4.2.14, donde la deformación puede darse en función del desplazamiento eléctrico.

$$S = gD \quad (4.2.14)$$

Referente a este proceso de deformación, es sabido que por la ley de Hooke los sólidos elásticos se comportan de acuerdo con la ecuación 4.2.15, donde ese es la compliancia, inverso del módulo de Young.

$$S = sT \quad (4.2.15)$$

Entonces, es posible unir las ecuaciones 4.2.8 con la propiedad descrita en la ecuación 4.2.15 podemos extender el cálculo de la deformación en el piezoeléctrico con la ecuación 4.2.16, que será un paralelismo a la fórmula desarrollada en la ecuación 4.2.11 y tendrá la misma forma.

$$S = dE + sT \quad (4.2.16)$$

Las ecuaciones 4.2.11 y 4.2.16 pueden escribirse como un sistema matricial en la ecuación 4.2.17, donde el desplazamiento electrónico y la deformación están en función del campo eléctrico y la tensión.

$$\begin{pmatrix} D \\ S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varepsilon & d \\ d & s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E \\ T \end{pmatrix} \quad (4.2.17)$$

Con el fin de liberar la tensión de la ecuación es posible reescribir estas ecuaciones como se muestra en las 4.2.18 y 4.2.19.

$$D = \frac{d}{s}S + \varepsilon \left(1 - \frac{d^2}{s\varepsilon}\right) \quad (4.2.18)$$

$$T = \frac{1}{s}S + \frac{d}{s}E \quad (4.2.19)$$

De las ecuaciones 4.2.18 y 4.2.19 es posible hacer tres cosas. Determinar dos nuevas constantes que relacionan la constante piezoeléctrica d con el factor de deformación elástico s como se muestra en la ecuación 4.2.20 en e y la proporción entre la energía aplicada y la transformada mostrada en la ecuación 4.2.21 en el valor k , que también incluye los factores d de la constante de carga piezoeléctrica, s de la ley de Hooke y ε de la permitividad mientras que la ecuación 4.2.22 no mostrará más

que el inverso de s en el valor c. Finalmente otra cosa posible de hacer es reordenar estas ecuaciones en un nuevo sistema de matrices que se muestra en la ecuación 4.2.23.

$$e = \frac{d}{s} \quad (4.2.20)$$

$$k^2 = \frac{d^2}{s\epsilon} = \frac{\text{energía convertida}}{\text{energía utilizada}} \quad (4.2.21)$$

$$c = \frac{1}{s} \quad (4.2.22)$$

$$\begin{pmatrix} D \\ T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \epsilon(1 - k^2) & e \\ e & c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E \\ S \end{pmatrix} \quad (4.2.22)$$

Entonces, las ecuaciones ya mencionadas determinarán el comportamiento directo e inverso. Pero, como es posible deducir pues ya fue previamente inferido, el efecto piezoeléctrico incide sobre todas las caras de la pieza, producto de la orientación de los dipolos en sus respectivos granos (figura 4.2.19). Además de la manera en la que las celdas unitarias se ven desordenadas, producto de la tensión aplicada. Es por esto que la constante de carga piezoeléctrica debe de referirse según la relación entre la aplicación de la tensión y el desplazamiento eléctrico como se muestra en la figura 4.2.20 que enumera los ejes (Gómez, 2018). Es por esto que las ecuaciones deben ser ajustadas de acuerdo con dichos parámetros en el subíndice de la constante piezoeléctrica d y de las constantes relacionadas a esta como g o e, donde el primero dirá es sentido de la tensión y el segundo el de la carga.

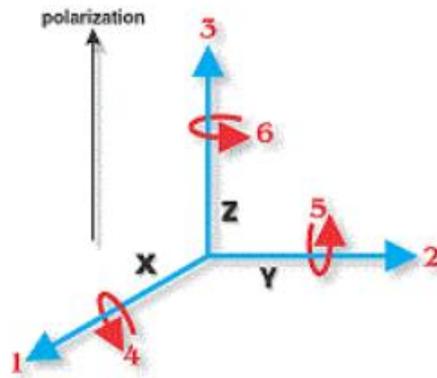


Figura 4.2.20. Numeración de los ejes según sentido de la tensión y orientación del desplazamiento eléctrico (Salas, 2017).

Todas las constantes relacionadas con el funcionamiento de los piezoeléctricos se ven mostradas en la tabla 4.2.2.

| Símbolo | Nombre | Unidades [SI] | Equivalencia |
|------------|-------------------------------------|---------------|------------------------|
| c | Módulo de Young | N / m^2 | $c = 1 / s$ |
| e | Tensión piezoeléctrica | $N / m V$ | $e = 1 / g$ |
| ϵ | Permitividad del medio | F / m | $\epsilon = 1 / \beta$ |
| d | Constante de carga piezoeléctrica | m / V | $s = 1 / h$ |
| s | Compliancia del medio | m^2 / N | - |
| g | Constante de tensión piezoeléctrica | $V m / N$ | - |
| h | Voltaje piezoeléctrico | V / m | - |
| β | Impermitividad del medio | m / F | - |

Tabla 4.2.2. Constantes piezoeléctricas, (Malmcrona, 2018).

Ya en la aplicación de un sistema piezoeléctrico, este se puede reescribir como múltiples circuitos equivalentes. De acuerdo con Malmcrona (2018), podemos

distinguir cuatro modelos equivalentes que abordaremos a continuación, mientras que Gómez (2018) propone uno más práctico que también será descrito.

El primero de los modelos, mostrado por la figura 4.2.21, refleja el comportamiento de un piezoeléctrico en un circuito que cuenta con una resistencia por el disco piezoeléctrico R_e , capacidad estática del transductor en C_e , la capacidad mecánica equivalente en C , L la inductancia mecánica y R la resistencia equivalente.

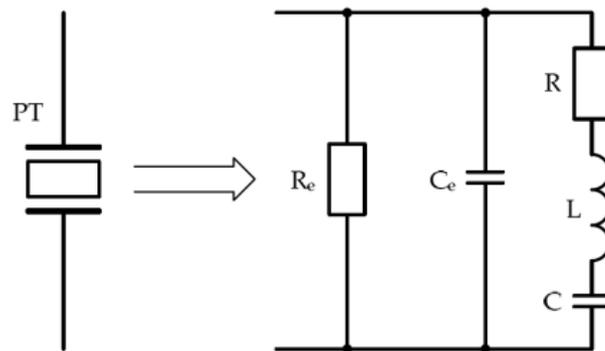


Figura 4.2.21. Circuito equivalente 1 (Malmcrona, 2018).

De dicho circuito equivalente es posible hacer una reducción como se muestra en la figura 4.2.22 con su descripción matemática en las ecuaciones 4.2.23, 4.2.24 y 4.2.25.

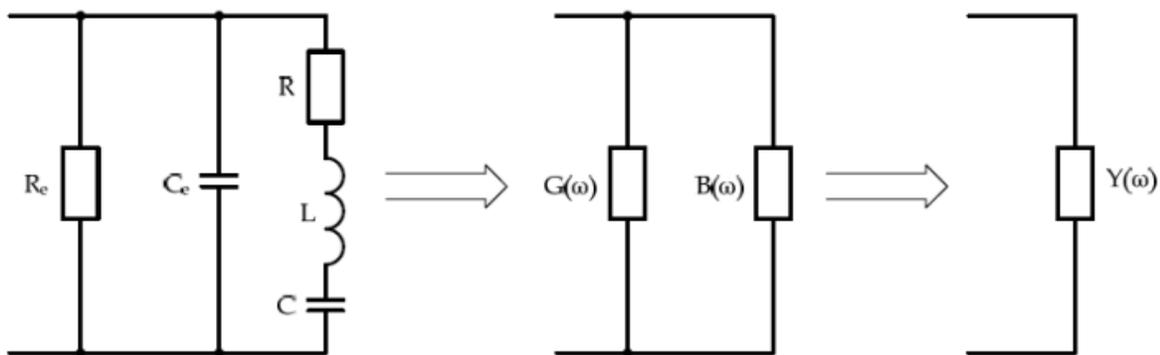


Figura 4.2.22. Reducción del circuito equivalente 1 (Malmcrona, 2018).

Las ecuaciones 4.2.23, 4.2.24 y 4.2.25 se muestran en función de la frecuencia ω , siendo esta equivalente a dos veces el producto de la frecuencia lineal por π y siendo G_e el inverso de R_e .

$$B(\omega) = \text{Im}Y(\omega) = \omega C_e + \frac{\omega C(1-\omega^2 LC)}{\omega^2 C^2 R^2 + (1-\omega^2 LC)^2} \quad (4.2.23)$$

$$G(\omega) = \text{Re}Y(\omega) = G_e + \frac{\omega^2 C^2 R}{\omega^2 C^2 R^2 + (1-\omega^2 LC)^2} \quad (4.2.24)$$

$$Y(\omega) = \sqrt{G^2 B^2} \quad (4.2.25)$$

Otro modelo equivalente, mostrado por la figura 4.2.23, de acuerdo con Malmcrona (2018), donde el sistema piezoeléctrico se encuentra dividido en una sección mecánica que explica las pérdidas energéticas a consecuencia de propiedades tales como el calor y en parte eléctrica que define las pérdidas dieléctricas.

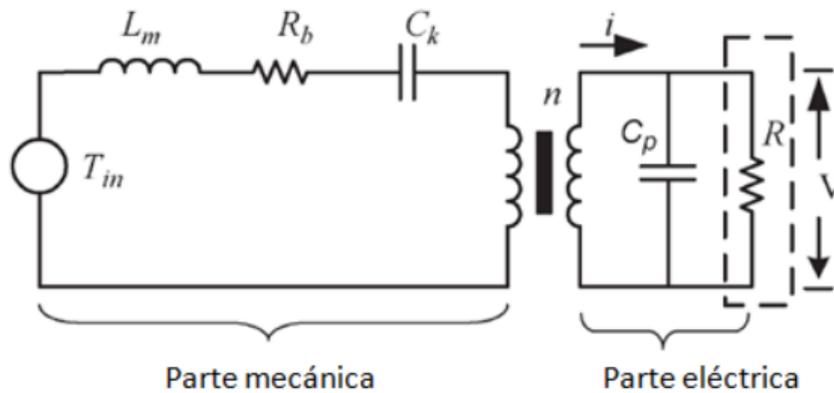


Figura 4.2.23. Circuito equivalente 2 (Malmcrona, 2018).

Un tercer circuito mostrado por el autor Malmcrona (2018) crea dos circuitos equivalentes simples dependiendo de si se aplica como sensor o actuador. Este modelo se muestra en la figura 4.2.24, donde el inciso a determina el actuador y el inciso b el sensor. Este modelo solo funciona para aplicaciones de baja frecuencia, donde los valores C_p y R_p son valores que los fabricantes deben indicar y el comportamiento dependerá totalmente de la tensión aplicada (eléctrica o mecánica).

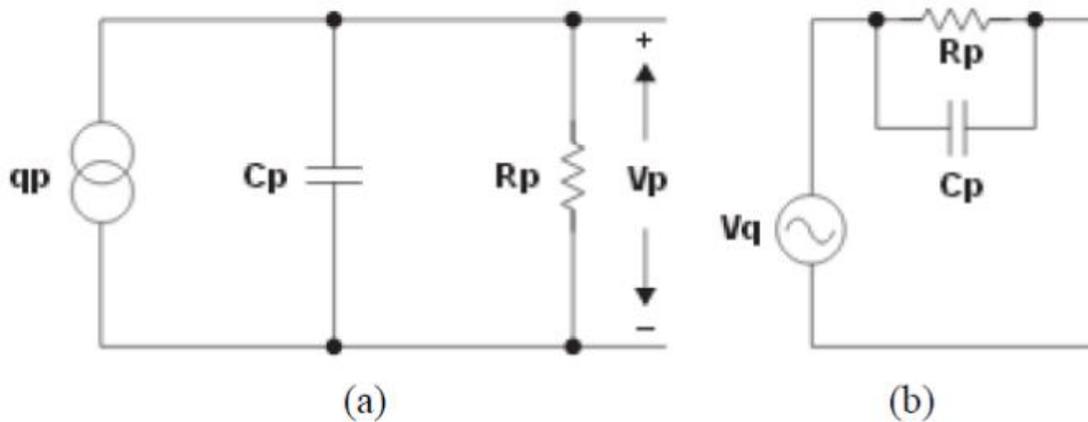


Figura 4.2.24. Circuito equivalente 3 (Malmcrona, 2018).

El último circuito equivalente de Malmcrona (2018) se muestra como el más sencillo de los tres que se muestra en la figura 4.2.25, totalmente orientado al *energy harvesting*. Por ende, opera a bajas frecuencias y cuenta con solo valores de capacitancia e impedancia, dados por propiedades del propio instrumento.

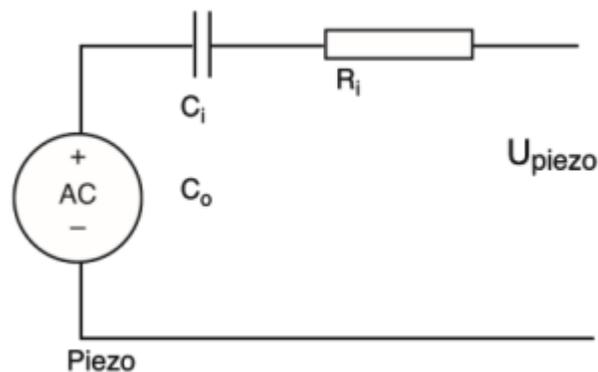


Figura 4.2.25. Circuito equivalente 4 (Malmcrona, 2018).

Mientras tanto, el modelo de Gómez (2018) no se entiende más que como un capacitor conectado en serie o en paralelo según si se desempeña como actuador en la primera sección o sensor en la segunda (de la figura 4.2.26).

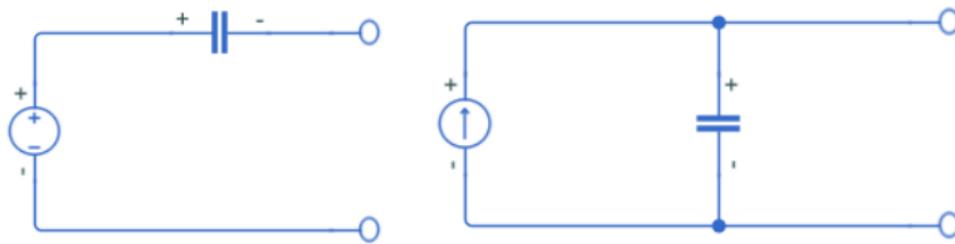


Figura 4.2.26. Circuito equivalente 5 (Gómez, 2018).

Dichos circuitos equivalentes deben ser usados de acuerdo con las especificaciones de la aplicación, en este caso los más apropiados serán los últimos tres. Particularmente el modelo 4 por usarse en el *energy harvesting*.

Físicamente hablando, para aplicaciones de generación energética, se encuentran tres configuraciones populares y descritas por Gómez (2018). Todas aprovecharán una fuerza física para ejercer tensión sobre el transductor y generar electricidad.

El primer mecanismo está enfocado en vibración y oscilación de objetos (figura 4.2.27) y actúa como una viga o un cantiléver con una masa en un extremo que al moverse ejercerá fuerzas de compresión o tracción sobre los laterales del transductor (Gómez, 2018).

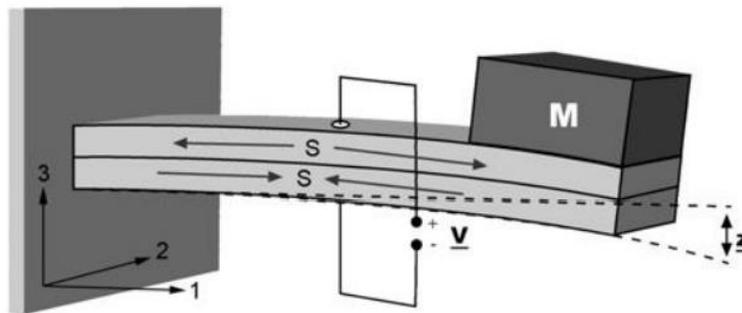


Figura 4.2.27. Configuración en cantiléver (Gómez, 2018).

El segundo mecanismo transfiere la fuerza al piezoeléctrico de manera lateral haciendo las veces de un botón o resorte que será aplastado y por su forma de címbalo

(mostrada en la figura 4.2.28) los extremos del piezoeléctrico serán tensados (Gómez, 2018).

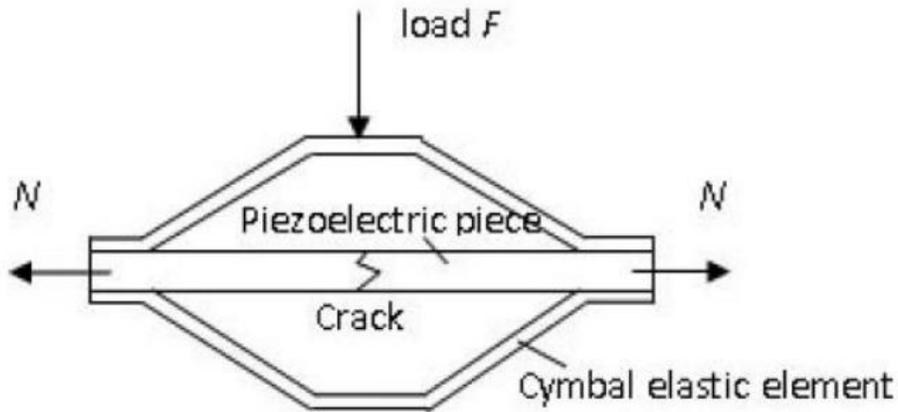


Figura 4.2.28. Configuración en címbalo (Gómez, 2018).

La tercera de las configuraciones es un arreglo piezoeléctrico en capas que permite la extracción de gran parte de la energía y que además puede tomar la procedente de múltiples de las caras del material. La configuración en pila o *stack* de la figura 4.2.29 apila un número dado de láminas piezoeléctricas con sus respectivos electrodos para absorber la energía (Gómez, 2018).

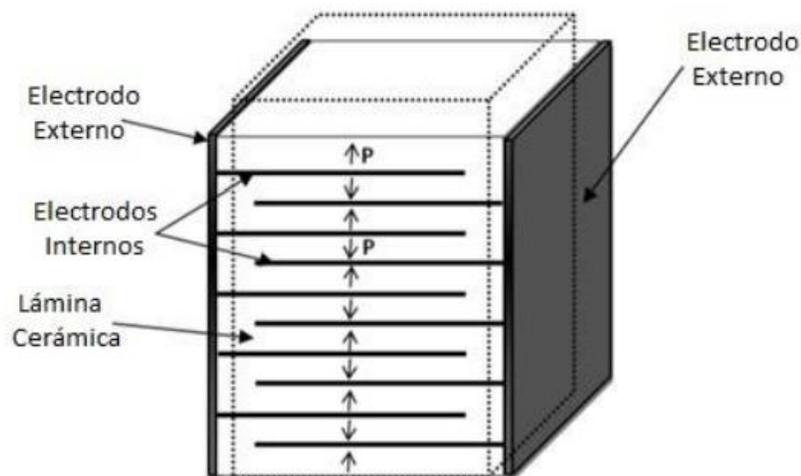


Figura 4.2.29. Configuración de pila (Gómez, 2018).

Capítulo 5: Metodología

5.1.-Planeación

El desarrollo del modelo propuesto siguió un proceso determinado. Desde el medio de aplicación, el funcionamiento proyectado para el sistema, una investigación y cálculos desarrollados para los procesos de diseño en aplicaciones similares, el diseño de un modelo, su simulación y ajuste de parámetros y, finalmente, el diseño de un prototipo físico. Este proceso es mostrado a grandes rasgos en la figura 5.1.1.

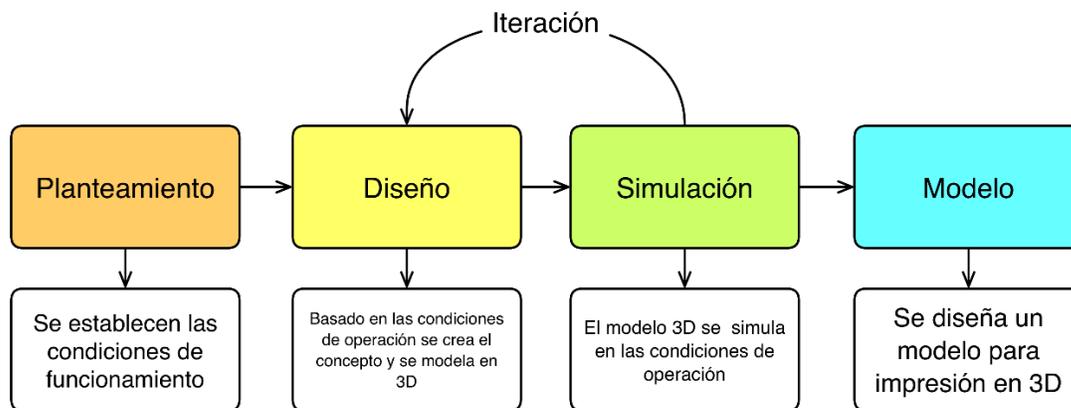


Figura 5.1.1. Proceso de desarrollo del proyecto.

5.2.-Planteamiento

Después de un arduo proceso de discusión sobre posibles aplicaciones de piezoelectricidad como generador eléctrico en modelos de aerogeneradores para espacios urbanos, se optó por aprovechar el arrastre aerodinámico automotriz en avenidas de alta velocidad dentro de la ciudad. Estas implican una gran pérdida energética que puede ser aprovechable para un modelo de *energy harvesting* que alimente un sistema de bajo consumo como un controlador dedicado al internet de las cosas (con bajos consumos) o una aplicación de mayor potencia como la alimentación de luminaria pública reduciendo gastos en infraestructura.

Una investigación general de parámetros establecidos dentro de las avenidas dio como resultado una lista de estándares internacionales que, pese a no ser norma

en todas partes, son el parámetro más adecuado para modelar el proyecto y determinar el funcionamiento. La distancia de separación entre dos vehículos que circulan sobre el mismo carril, la distancia dejada entre el automóvil y el lateral de la avenida, así como el tamaño promedio de los vehículos en todas sus dimensiones, alto, largo y ancho, son establecidas como variables de importancia durante esta sección del proceso.

Como punto de partida se establecen los criterios para determinar la distancia adecuada de conducción entre dos automóviles que circulan uno detrás del otro. Basado en la tabla 5.2.1, donde la distancia entre automóviles será determinada por la velocidad a la que estos se desplazan, considerando el tiempo de reacción del reflejo humano (aproximadamente tres cuartos de segundo) y el tiempo en que los frenos y los neumáticos tardarán en detener el vehículo.

| Parámetro | Fórmula |
|--------------------------------------|--------------|
| $V > 57\text{km/h}$ | $D = 2s * V$ |
| $73\text{km/h} > V > 57\text{km/h}$ | $D = 3s * V$ |
| $100\text{km/h} > V > 73\text{km/h}$ | $D = 4s * V$ |

Tabla 5.2.1. Estándares para determinar distancia entre automóviles.

Por otro lado, la distancia establecida para los laterales entre automóviles o entre automóviles y laterales de la calle como paredes, muros de contención o algún otro referente, debe ser de aproximadamente metro y medio.

Mientras que se desempeña un proceso de estandarizado para determinar las medidas promedio de automóviles particulares, el ejercicio no contempla vehículos de mayor tamaño ni pesados dado que estos deberían limitar su velocidad. En la tabla 5.2.2 se muestra un listado de las dimensiones promedio de distintos tipos de autos en su altura y posteriormente se obtiene un promedio total. Las tablas 5.2.3 y 5.2.4 hacen lo propio para las dimensiones del largo y el ancho de un vehículo promedio.

| Tipo de automóvil | Medidas mínimas y máximas |
|-------------------|---------------------------|
| SUV | 1.624m - 2.035m |
| Mini | 1.414m – 1.578m |
| Hatchback | 1.418m – 1.575m |
| Sedán | 1.429m – 1.550m |
| MPV | 1.530m – 1.860m |
| Promedio | 1.483m – 1.720m |
| Resultado | 1.600m |

Tabla 5.2.2. Medidas promedio alto de un automóvil particular.

| Tipo de automóvil | Medidas mínimas y máximas |
|-------------------|---------------------------|
| SUV | 1.760m – 2.008m |
| Mini | 1.665m – 1.780m |
| Hatchback | 1.703m – 1.871m |
| Sedán | 1.693m – 1.895m |
| MPV | 1.695m – 1.928m |
| Promedio | 1.703m – 1.896m |
| Resultado | 1.800m |

Tabla 5.2.2. Medidas promedio ancho de un automóvil particular.

| Tipo de automóvil | Medidas mínimas y máximas |
|-------------------|---------------------------|
| SUV | 4.662m – 5.130m |
| Mini | 3.821m – 4.084m |
| Hatchback | 4.425m – 4.726m |
| Sedán | 4.236m – 4.966m |
| MPV | 4.068m – 5.130m |
| Promedio | 4.242m – 4.807m |
| Resultado | 4.525m |

Tabla 5.2.2. Medidas promedio largo de un automóvil particular.

Así, el modelo estándar de automóvil que se considera para los cálculos desarrollados incluirá un automóvil de un metro con setenta centímetros de alto, un

metro con ochenta centímetros de ancho y cuatro metros con cincuenta y dos centímetros de largo.

El sistema propuesto para el aerogenerador aprovecha los cambios de presión atmosférica, producto del paso de un automóvil que con su geometría pretende desplazar secciones de aire, con una burbuja de alta presión al frente del vehículo y una cola de baja presión tras de este. Las diferencias de presión, producto de la perturbación de los coches que transitan, será captada por una superficie en forma de placa que se encontrará paralela a la avenida y transformará esta diferencia de presiones en una fuerza que actúe como una palanca. La fuerza de palanca generada será detenida completamente por un arreglo de piezoeléctricos en pilas que absorberán la totalidad de la energía ya que el diseño se asegurará de neutralizar la flexión del mecanismo con materiales y geometrías que den alta rigidez y con articulaciones que liberen el movimiento del sistema.

El modelo cinemático mostrado en la figura 5.2.1 muestra un sistema de torre con masa despreciable anclada al suelo con una masa al extremo contrario de esta, sobre la que se aplicará una fuerza externa que provocará una oscilación (en el caso ideal en solo un grado de libertad como se muestra, de derecha a izquierda) y a este modelo solo se opondrá la rigidez de la misma torre con valor k determinado por la geometría de esta y el material del que esté compuesta, así como la longitud. Y, para que el diseño opere de la mejor manera, la rigidez debe ser la mayor posible para que la mayor parte de la energía se transfiera a la intersección entre la barra y el suelo. La idea del sistema es que opere en condiciones de frecuencia resonante, aquella frecuencia de fuerza que se sintoniza con la oscilación en el movimiento del sistema para que con la aplicación de este empuje el movimiento se magnifique constantemente. La fórmula de la frecuencia de resonancia se muestra en la ecuación 5.2.1, esta será obtenida mediante aproximación numérica en simulador *Discovery Ansys* y no de manera matemática.

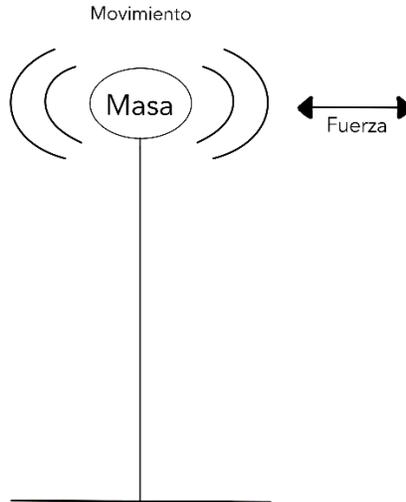


Figura 5.2.1. Modelo cinemático de torre con masa despreciable.

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \rightarrow T = \frac{2\pi}{\omega} \rightarrow f = \frac{1}{T} \quad (5.2.1)$$

Este modelo ya en su forma de mecanismo es mostrado en la figura 5.2.2, donde se muestra una representación del sistema propuesto. Una placa paralela al paso de los automóviles que capta las fuerzas producidas por la diferencia de presión, el centro de masa se encontrará sobre la barra vertical en una posición dada por la propia geometría del modelo y esta barra estará sujeta por tres articulaciones, estas tres articulaciones detienen por completo el movimiento sobre los dos ejes (x y y) siendo que sobre los laterales se ubicarán en los anclajes laterales que impiden el movimiento sobre x, causando que al momento de aplicar una fuerza sobre la placa esta pretenda oscilar y toda la fuerza se aplique sobre los transductores.

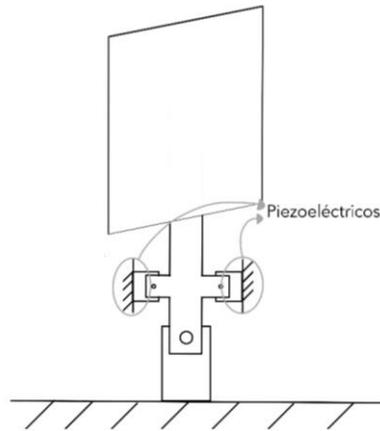


Figura 5.2.2. Modelo del mecanismo propuesto.

Ya el modelo en CAD 3D es mostrado en la figura 5.2.3 para hacer aún más gráfico el funcionamiento del sistema. Mientras que el mecanismo esta postrado en la figura 5.2.4, donde las articulaciones laterales emulan un sistema de biela pistón y corredera. Este movimiento no se dará dado que los transductores piezoeléctricos deberán llenar por completo el espacio vacío deteniendo cualquier desplazamiento posible y absorbiendo toda la fuerza.

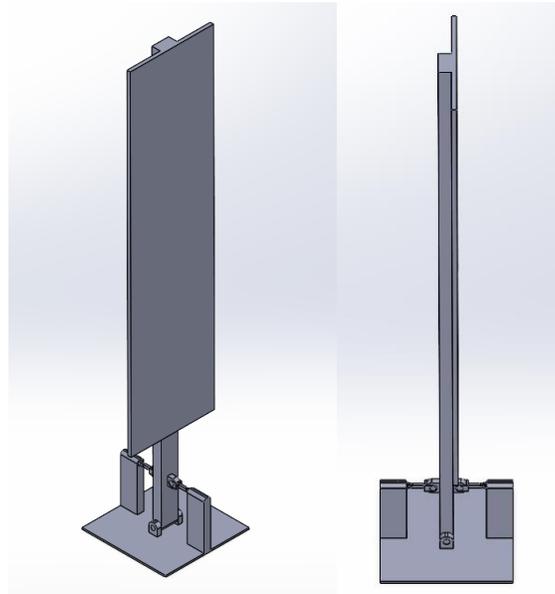


Figura 5.2.3. Sistema modelado en 3D.

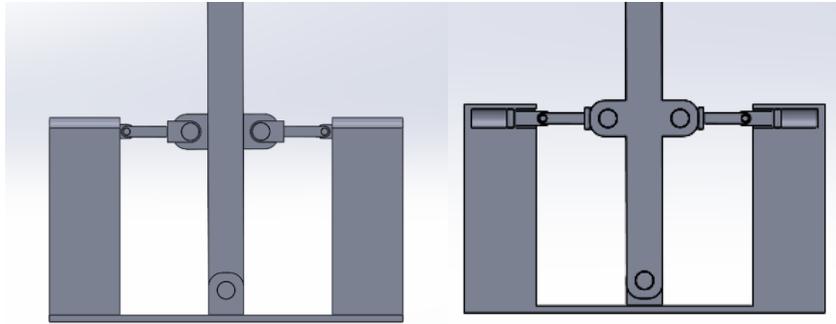


Figura 5.2.4. Mecanismo modelado en 3D.

Para determinar las dimensiones del modelo es necesario determinar el transductor piezoeléctrico que se utilizará para conocer la fuerza mecánica que este es capaz de soportar y la frecuencia de resonancia que el fabricante provee en las especificaciones del producto. Así como las condiciones en las que el mecanismo será implementado para conocer la velocidad del flujo vehicular en la avenida de instalación. Según esta información se puede determinar las presiones generadas por la aerodinámica del automóvil, así como el ritmo al que estos pasan. Con estos valores de fuerza aplicada y fuerza resistida. Además de la frecuencia implementada y frecuencia de operación es posible ajustar el diseño para optimizar el comportamiento de este.

Las propiedades físicas y mecánicas del transductor piezoeléctrico son brindadas por el proveedor y determinadas por la geometría y el material de este. Por lo que serán de fácil conocimiento (para conocer las propiedades mecánicas de los materiales piezoeléctricos se utilizará el repositorio MatWeb que también incluye información como los coeficientes piezoeléctricos definidos en el marco teórico) y debemos conocer la frecuencia de resonancia y el límite de elasticidad de este.

Por otra parte, la información dependiente de la aplicación se determinará con una simulación de aerodinámica en Discovery Ansys que muestre las presiones obtenidas de acuerdo con la velocidad de los automóviles. Mientras que la frecuencia del tránsito estará dada por la velocidad de los automóviles y las dimensiones antes mencionadas.

5.3.- Diseño

El presente trabajo describe el proceso de diseño para un sistema sea cual sea la aplicación y los materiales utilizados. Pero para ejemplificar el proceso se tomará como referente una avenida con límite de velocidad de noventa kilómetros por hora y piezoeléctricos comerciales tipo *buzzer* de tres punto cinco centímetros de diámetro (figura 5.3.1).

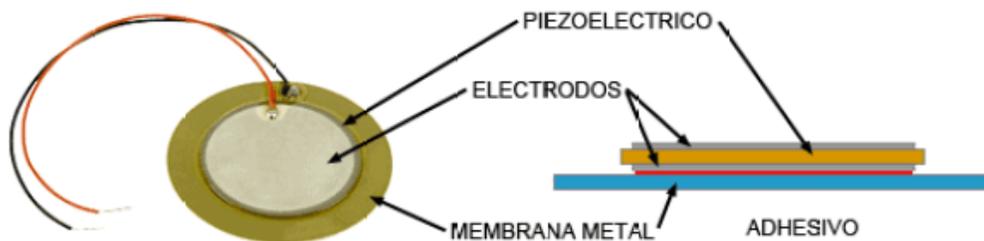


Figura 5.3.1. Piezoeléctrico utilizado (Zaragoza, 2018).

Los piezoeléctricos son un modelo comercial de cisco utilizados para proyectos de electrónica como sensores y actuadores (de sonido) del mayor tamaño comercial, 3.5cm, con una frecuencia de resonancia de en promedio dos mil setecientos Hertz. El material no está especificado en ninguna de las hojas de datos consultadas, por lo que se calculará como si se tratara de PZT por ser el cristal más común implementado por la industria. Lo que resulta en un máximo de cuarenta mega pascales según MatWeb (s.f.).

En cuanto al análisis del flujo vehicular, se utilizará una simulación hecha con modelos tridimensionales de automóviles comerciales, en este caso de una camioneta mercedes clase G, pickup cybertruck y auto compacto Datsun en simulación de flujo aerodinámico para análisis de presión (figura 5.3.2).

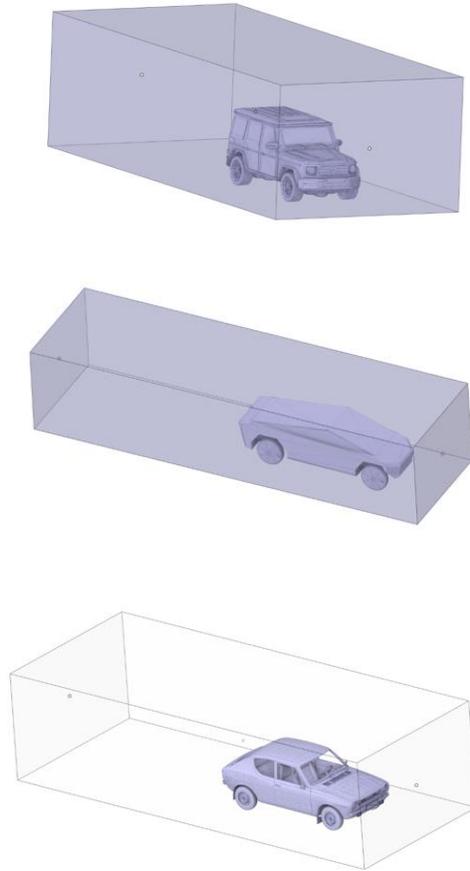


Figura 5.3.2. Modelos para simulación de aerodinámica.

La figura 5.3.3 muestra el análisis de diferencia de presión resultante de la simulación de la camioneta modelo G. La figura 5.3.4 plasma el mismo procedimiento de la pickup. Y, finalmente, la figura 5.3.5 hace lo propio con el Datsun. Las simulaciones mostradas en estas imágenes fueron creadas con condiciones de velocidad de viento de veinticinco metros sobre segundo, equivalente a los noventa kilómetros por hora dentro de un flujo de viento en condiciones ideales de densidad y viscosidad y con un parámetro de presión cero como sugiere la propia empresa del software *Ansys* en sus tutoriales de internet. De esta manera las presiones plasmadas se interpretarán como aumentos o disminuciones a la presión atmosférica.

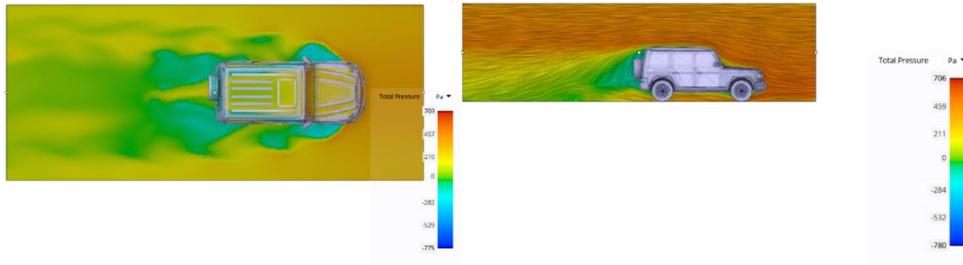


Figura 5.3.3. Simulación de presiones Mercedes G.

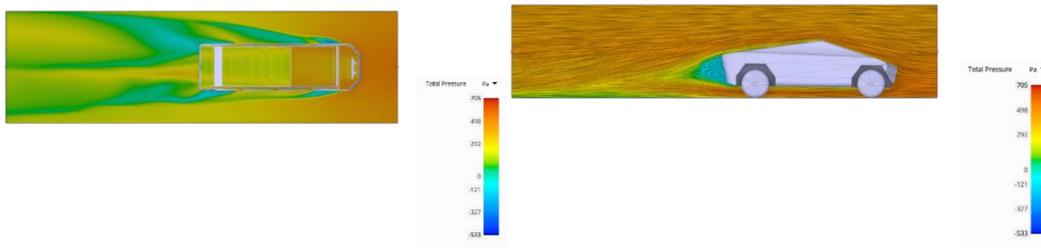


Figura 5.3.4. Simulación de presiones tesla cybertruck.

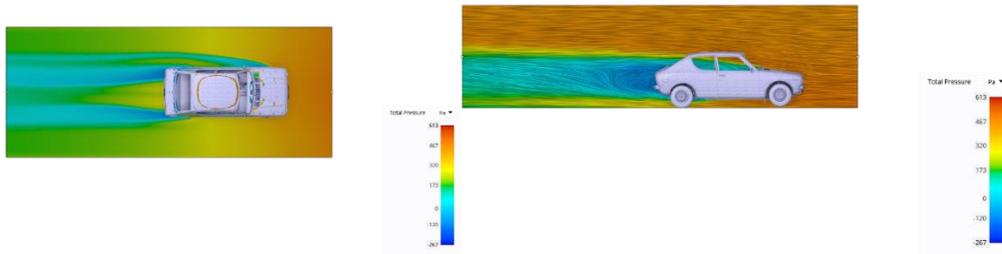


Figura 5.3.5. Simulación de presiones Datsun.

De las figuras podemos interpretar dos cosas. En primera instancia, que la burbuja de alta presión en la parte frontal del automóvil es prácticamente nula lo que puede deberse a la evolución y el arduo trabajo de aerodinámica desempeñado por el sector automotriz justamente con la intención de reducir la resistencia aerodinámica para mejorar el rendimiento y la eficiencia de estos mismos. La segunda cosa que resaltar es que, en los laterales del automóvil, si vemos a través de una línea que se encuentre aproximadamente a un metro de estos autos, la diferencia de presiones con el paso de los vehículos va de entre los seiscientos pascales y los trescientos pascales dependiendo de la geometría del modelo.

La frecuencia del tránsito se obtendrá de la velocidad del flujo vehicular, las medidas estandarizadas previamente para los vehículos y la distancia de seguridad entre automóviles también ya mencionada. La distancia de seguridad debe ser de entre cincuenta y cien metros (dado que la velocidad es de veinticinco metros sobre segundo), como esta no es comúnmente respetada se tomará un divisor común que permita operar en todos los casos por lo que se determinará una de doce metros y medio. Mientras que el largo de un automóvil en promedio es de cuatro metros y medio, sumado a la medida anterior tenemos una distancia de aproximadamente diecisiete metros entre pico de presión y pico de presión (ecuación 5.3.1).

$$d = \frac{d_{seguridad\ máxima} - d_{seguridad\ minima}}{4} + L_{auto\ promedio} \quad (5.3.1)$$

De la ecuación de velocidad igual a distancia sobre tiempo es posible despejar el tiempo requerido para recorrer los diecisiete metros a veinticinco metros por segundo que será de sesenta y ocho centésimas de segundo, para posteriormente determinar la frecuencia de los picos, aproximadamente uno punto cinco Hertz (ecuación 5.3.2).

$$t = \frac{d}{v} \rightarrow f = \frac{1}{t} \quad (5.3.2)$$

Ahora es posible calcular el área de la placa y sus dimensiones de acuerdo con la presión máxima del piezoeléctrico, la diferencia de presiones causada por los automóviles y las dimensiones estándar de estos. Con los valores obtenidos de cuarenta mega pascales como máxima presión sobre un transductor circular con diámetro de tres puntos cinco centímetros tenemos que, sobre el área superficial de novecientos sesenta y dos milímetros, podemos aplicar una fuerza redondeada de treinta y ocho punto cinco kilo newtons máximos (ecuación 5.3.3) y un factor de seguridad de punto setenta y cinco obtenemos una fuerza de veintiocho newtons (ecuación 5.3.4).

$$F = P * A \quad (5.3.3)$$

$$F_{fs} = F * 0.75 \quad (5.3.4)$$

Si la diferencia de presiones va de entre los cuatrocientos cincuenta pascales positivos hasta los menos ciento cincuenta pascales negativos, asumiendo que detrás de las palas la presión debería ser neutral, la diferencia de presiones debe ser a lo mucho los cuatrocientos cincuenta pascales, dando como resultado un área de como máximo seiscientos cuarenta y dos centímetros cuadrados (ecuación 5.3.5).

$$A = \frac{F}{p} \quad (5.3.5)$$

Dado que el modelo distribuye la fuerza del movimiento al tensar y comprimir dos arreglos de piezoeléctricos, esta área puede duplicarse para obtener el doble de fuerza manteniendo el mismo esfuerzo sobre los transductores. Esto solo funciona en un arreglo de doble fijación como el propuesto, dando como resultado un área de máximo mil doscientos ochenta y cuatro centímetros cuadrados.

Para reducir la fuerza de torsión sobre el modelo se pretende que se dé prioridad a la altura de la placa sobre la longitud de la base. En este caso se determina una superficie de veinticinco centímetros de ancho por cincuenta de largo, dando una superficie de mil doscientos cincuenta centímetros cuadrados.

Para la frecuencia del modelo se pueden descomponer la frecuencia resonante del piezoeléctrico de aproximadamente dos mil setecientos Hertz y la frecuencia de tránsito de aproximadamente uno punto cinco Hertz. Por ser el resultado de la frecuencia del flujo vehicular un valor divisor de la frecuencia de resonancia del transductor, tomaremos los múltiplos que sean igualmente divisores de la frecuencia natural como estándar para el modelo (ecuación 5.3.6). De esta manera la frecuencia del mecanismo deberá de ser de uno punto cinco, tres, seis, nueve, doce, quince o un múltiplo por diez de cualquiera de estos valores con la intención de que el funcionamiento armonice y el rendimiento sea el mayor posible.

$$f_{modelo} = mcd(f_{resonancia}, f_{vehicular}) \quad (5.3.6)$$

5.4.- Simulación

En Solidworks se crea una pala con las dimensiones antes mencionadas que cumpla con el criterio abordado con anterioridad de la mayor rigidez posible, para esto se utilizará un perfil de acero con el mayor grosor realizable y colocado de manera que aumente su resistencia a la flexión.

De esta manera se usará un perfil comercial de acero S275N por ser el más común en la industria; con dimensiones de cincuenta milímetros por veinticinco milímetros y un grosor de dos milímetros. Mientras tanto, la pala estará formada por una placa de acero S275N de tres milímetros, para igualmente aumentar la resistencia a la flexión y torsión, al mismo tiempo que se aumenta la masa sobre el centro de masa.

El diseño, reitero, consta de una pala de veinticinco centímetros de ancho por cincuenta centímetros de alto más un porte recto hecho de el mismo perfil rectangular que será alterado en longitud con el fin de conseguir una frecuencia optimizada. Esta longitud, en el modelo verdadero, representa la distancia entre la base, en concreto, el punto en el que el soporte de los piezoeléctricos cruza con la palanca, y la pala de captación.

La metodología seguida implicó la creación y simulación de frecuencias naturales alterando la longitud del poste del soporte de cinco centímetros en cinco centímetros empezando por cero y llegando a los cuarenta centímetros. Esto para posteriormente observar el cambio que tiene este aumento sobre la masa (lo que altera el centro de masa del objeto) y su impacto real en la frecuencia de resonancia de la pieza para más adelante, determinar una longitud o una serie de longitudes adecuadas para la aplicación propuesta.

Las tablas 5.4.1 a 7.4.9 muestran los resultados obtenidos para cada una de las simulaciones con el fin de sintetizar el contenido y facilitar la interpretación de este. Abordado con anterioridad, estas aumentan de cinco en cinco centímetros su longitud, incluyendo a manera de ficha técnica las dimensiones de la pieza, su masa, la frecuencia de resonancia e imágenes obtenidas del modelado en SolidWorks y del resultado de la simulación en Discovery Ansys con el desplazamiento causado por el

movimiento deseado, así como tomas de los esfuerzos sobre la pieza creada tanto por el frente como el reverso.

Los esfuerzos mostrados en las imágenes de las tablas 5.4.1 a 5.4.9 comprueban que la mayor parte de la fuerza captada se estaría redireccionando al anclaje de la pieza, mismo que en el sistema propuesto implica el contacto con los transductores piezoeléctricos y que, además, generan estos esfuerzos tanto positivos y negativos.

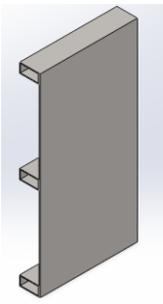
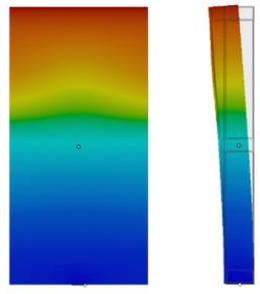
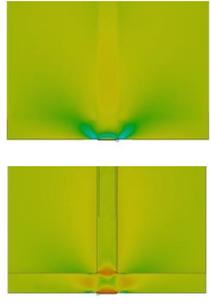
| Modelo | | Desplazamiento | | Esfuerzo | |
|---|------------------------|---|-------------|--|--|
|  | |  | |  | |
| Dimensiones | pala:25x50cm poste:0cm | Material | Acero S275N | | |
| Frecuencia | 126Hz | Masa | 5620g | | |

Tabla 5.4.1. Ficha técnica modelo cero centímetros.

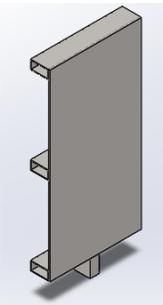
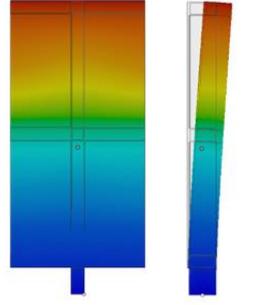
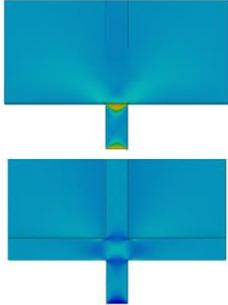
| Modelo | | Desplazamiento | | Esfuerzo | |
|---|------------------------|---|-------------|--|--|
|  | |  | |  | |
| Dimensiones | pala:25x50cm poste:5cm | Material | Acero S275N | | |
| Frecuencia | 90Hz | Masa | 5729g | | |

Tabla 5.4.2. Ficha técnica modelo cinco centímetros.

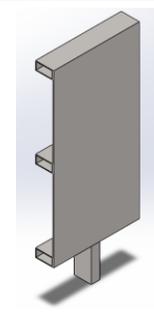
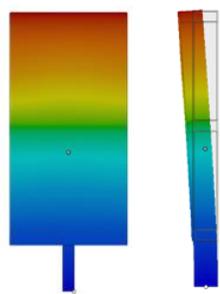
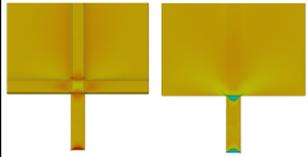
| Modelo | | Desplazamiento | Esfuerzo |
|---|-------------------------|---|--|
|  | |  |  |
| Dimensiones | pala:25x50cm poste:10cm | Material | |
| Frecuencia | 70.7Hz | Masa | 5840g |

Tabla 5.4.3. Ficha técnica modelo diez centímetros.

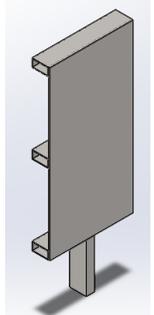
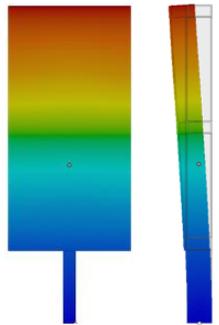
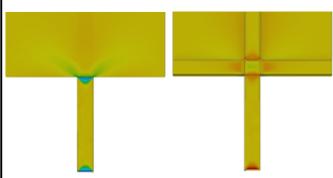
| Modelo | | Desplazamiento | Esfuerzo |
|--|-------------------------|--|---|
|  | |  |  |
| Dimensiones | pala:25x50cm poste:15cm | Material | Acero S275N |
| Frecuencia | 58Hz | Masa | 5951g |

Tabla 5.4.4. Ficha técnica modelo 15 centímetros.

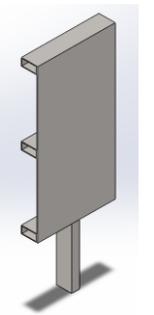
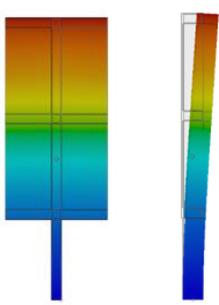
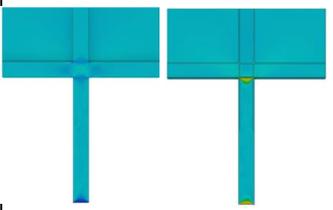
| Modelo | | Desplazamiento | Esfuerzo |
|---|-------------------------|---|--|
|  | |  |  |
| Dimensiones | pala:25x50cm poste:20cm | Material | Acero S275N |
| Frecuencia | 49.5Hz | Masa | 6061g |

Tabla 5.4.5. Ficha técnica modelo veinte centímetros.

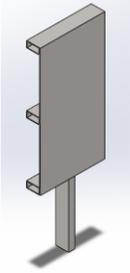
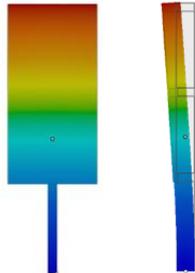
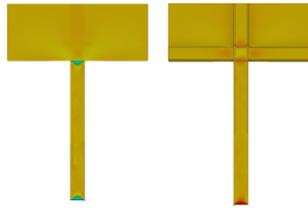
| Modelo | | Desplazamiento | | Esfuerzo | |
|---|-------------------------|---|-------------|--|--|
|  | |  | |  | |
| Dimensiones | pala:25x50cm poste:25cm | Material | Acero S275N | | |
| Frecuencia | 42.1Hz | Masa | 6177g | | |

Tabla 5.4.6. Ficha técnica modelo veinticinco centímetros.

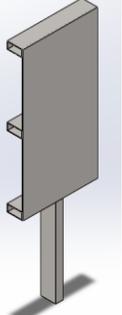
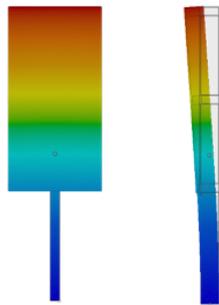
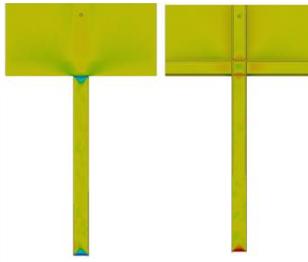
| Modelo | | Desplazamiento | | Esfuerzo | |
|--|-------------------------|--|-------------|---|--|
|  | |  | |  | |
| Dimensiones | pala:25x50cm poste:30cm | Material | Acero S275N | | |
| Frecuencia | 36.7Hz | Masa | 6283g | | |

Tabla 5.4.7. Ficha técnica modelo treinta centímetros.

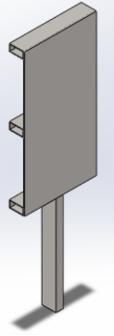
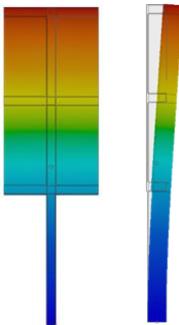
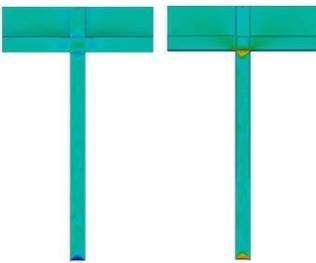
| Modelo | | Desplazamiento | | Esfuerzo | |
|---|-------------------------|---|-------------|--|--|
|  | |  | |  | |
| Dimensiones | pala:25x50cm poste:35cm | Material | Acero S275N | | |
| Frecuencia | 32.7Hz | Masa | 6394g | | |

Tabla 5.4.8. Ficha técnica modelo treinta y cinco centímetros.

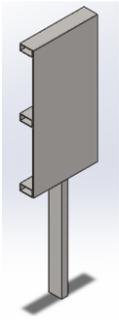
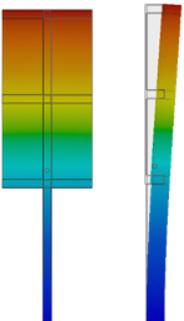
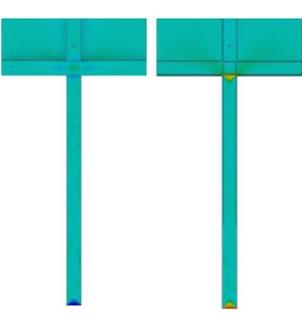
| Modelo | | Desplazamiento | | Esfuerzo | |
|---|-------------------------|---|-------|--|--|
|  | |  | |  | |
| Dimensiones | pala:25x50cm poste:40cm | Material | S275N | | |
| Frecuencia | 29.2Hz | Masa | 6504g | | |

Tabla 7.4.9. Ficha técnica modelo cuarenta centímetros.

5.5.- Modelo

Ya con las simulaciones hechas se respalda la propuesta de diseño de manera no solo teórica si no física y numérica. El siguiente paso implica la creación de un modelo a escala que permita hacer distintas pruebas. Como ya fue antes mencionado, se determinaron como los piezoeléctricos a utilizar un modelo comercial de electrónica tipo buzzer con diámetro de tres centímetros y medio mientras que el resto del invento será diseñado en SolidWorks e impreso en 3D.

Primeramente, se diseñó el prototipo de la figura 5.5.1 y 5.5.2, el cual fue impreso por partes. Sin embargo, no se pudo ensamblar dado que el diseño no contempló márgenes de error en las dimensiones, el proceso de preparado de piezas (cortado y lijado) y el armado final. Además, este diseño incluye una placa sobredimensionada que tenía la intención de aumentar el centro de masa de este para tener un mejor rendimiento, lo que implicó un problema para la manufactura de este tanto por su tamaño como por el material utilizado.

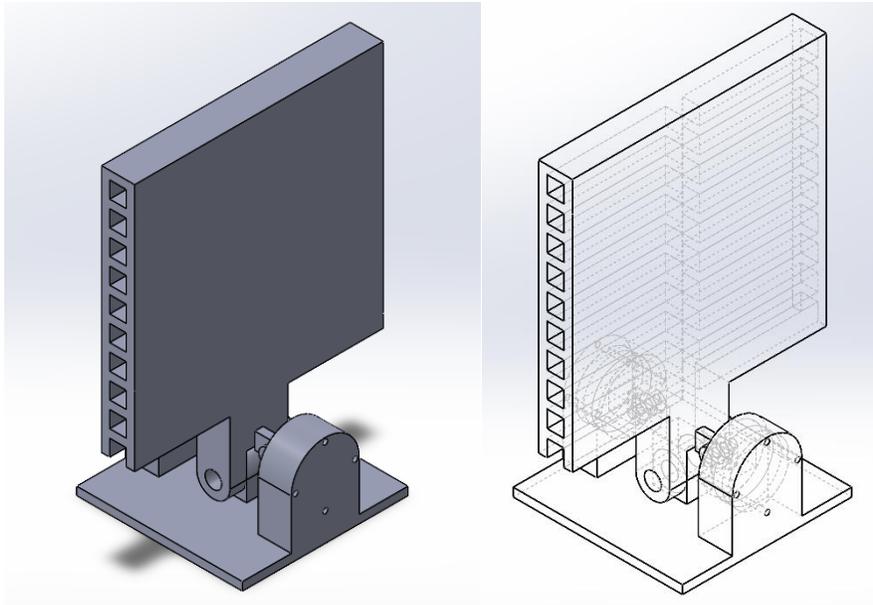


Figura 5.5.1. Modelo uno, *SolidWorks* perspectiva completa.

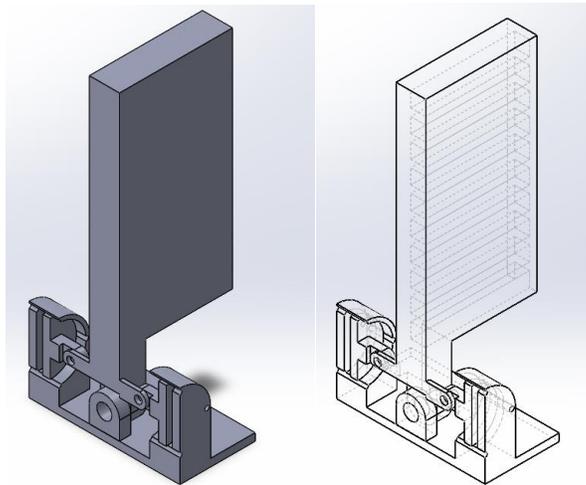


Figura 5.5.2. Modelo uno, *SolidWorks* perspectiva sección.

Posteriormente se realizó un segundo modelo para impresión (mostrado en la figura 5.5.3 y 5.5.4) que toma en cuenta todos los errores del modelo anterior para facilitar tanto la fabricación como el preparado y el armado. De esta manera se obtuvo un prototipo ensamblado con un funcionamiento mecánico adecuado para demostraciones futuras.

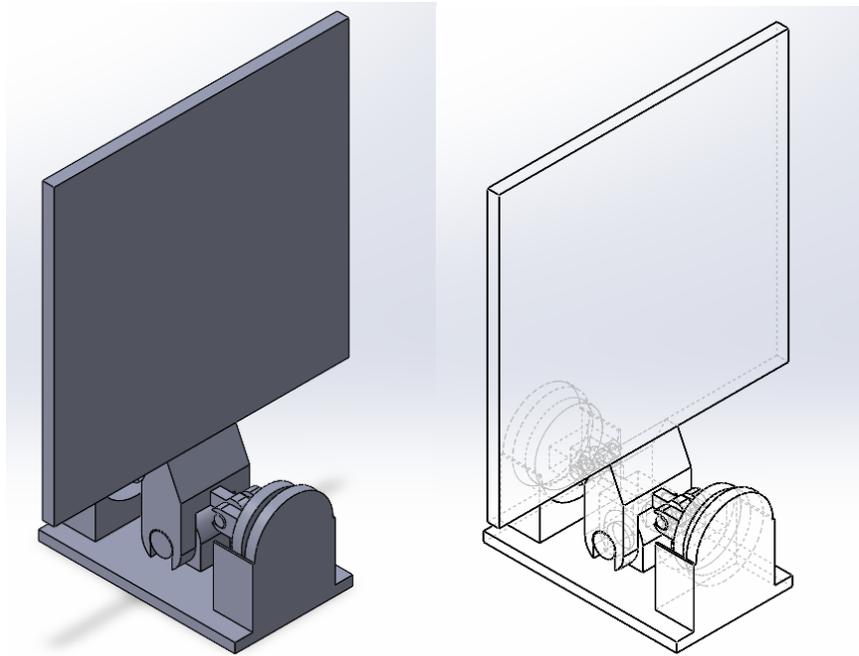


Figura 5.5.3. Modelo dos, *SolidWorks* perspectiva completa.

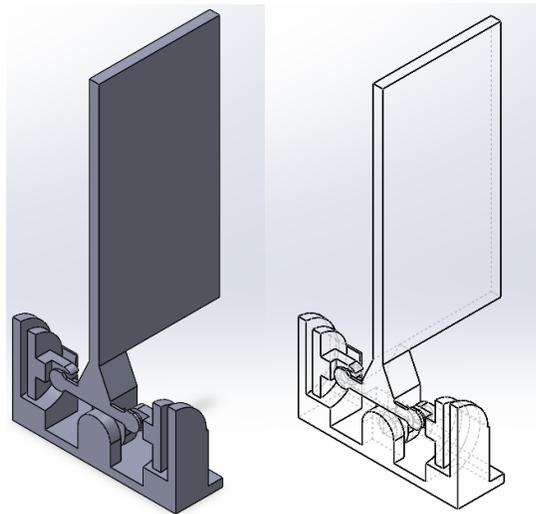


Figura 5.5.4. Modelo uno, *SolidWorks* perspectiva sección.

Capítulo 6: Resultados y discusión

6.1.- Simulación

Del conjunto de simulaciones hecho se creó la tabla 6.1.1 que alinea los valores de masa y frecuencia natural de cada uno de los modelos para facilitar el análisis de

los resultados obtenidos. Es posible notar que, como se pretendió durante la metodología, la frecuencia de resonancia se viera afectada dada la variación de la longitud del poste-soporte ya que esta tiene un efecto directo sobre la respuesta a la flexión de la pieza descrita por la ley de Hooke. También es posible notar que, como se puede imaginar, el aumento de la longitud tenga un impacto en la masa total de la pieza, lo que alterará el centro de gravedad y cambiará de este otro modo a la frecuencia de resonancia.

| Longitud del poste (cm) | Masa (g) | Frecuencia (Hz) |
|-------------------------|----------|-----------------|
| 0 | 5620 | 126 |
| 5 | 5729 | 90 |
| 10 | 5840 | 70.7 |
| 15 | 5951 | 58 |
| 20 | 6061 | 49.5 |
| 25 | 6177 | 42.1 |
| 30 | 6283 | 36.7 |
| 35 | 6394 | 32.7 |
| 40 | 6504 | 29.2 |

Tabla 6.1.1. Longitud de poste, masa y frecuencia de los modelos creados.

Estos valores podemos graficarlos como se muestra en las figuras 6.1.1 y 6.1.2. Donde la masa en función de la longitud y la frecuencia en función de la longitud son plasmadas respectivamente.

Como es posible observar en la gráfica de la figura 6.1.1, la masa total tiene un aumento perfectamente lineal en función de la longitud obtenida, además de que se puede ver en el valor inicial cero que la masa total de la placa con los respectivos soportes es de más de cinco kilogramos y medio. Esto nos permite notar una diferencia de menos de un kilogramo respecto a la última medición, lo que significa que el aumento en peso de la pieza después de añadir los cuarenta centímetros de poste tiene un aumento de menos del veinte por ciento inicial, este bajo aumento de la magnitud permite concluir que el poste alterará en poco al centro de masa de la pieza, por lo que no es necesario incluir un contrapeso en la zona superior de la placa.

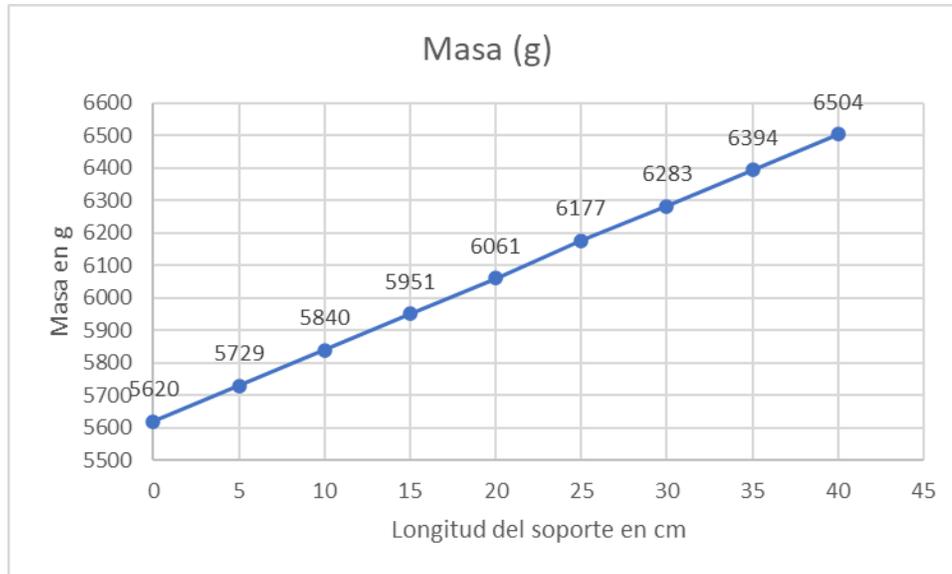


Figura 6.1.1. Gráfica de masa en función de la longitud del poste.

La gráfica de la figura 6.1.2 permite observar que la disminución en la frecuencia de resonancia del modelo se comporta de manera no lineal, posiblemente cuadrática, con tendencia a detener su incremento. Por lo que llegar a valores más bajos de frecuencia como quince Hertz o cualquier otro múltiplo bajo de uno punto cinco Hertz ya que la longitud necesaria para alcanzarlos implica un desplazamiento de la placa captadora que secaría a esta zona de funcionamiento establecida debajo de al menos un metro con sesenta centímetros según los valores de vehículos estándar establecidos anteriormente. En sentido contrario, es posible notar que el máximo de frecuencia posible con este diseño de pala es de ciento veintiséis Hertz dado que esta es la menor de las longitudes posibles para el soporte. Por lo que, por consecuente, los valores de frecuencia de operación se deberán encontrar entre estos ciento veintiséis Hertz y los veintinueve Hertz (tal vez un poco menos, llevando la longitud del poste hasta los cincuenta centímetros, pero tendrá un efecto ya casi despreciable para reducir esta magnitud).

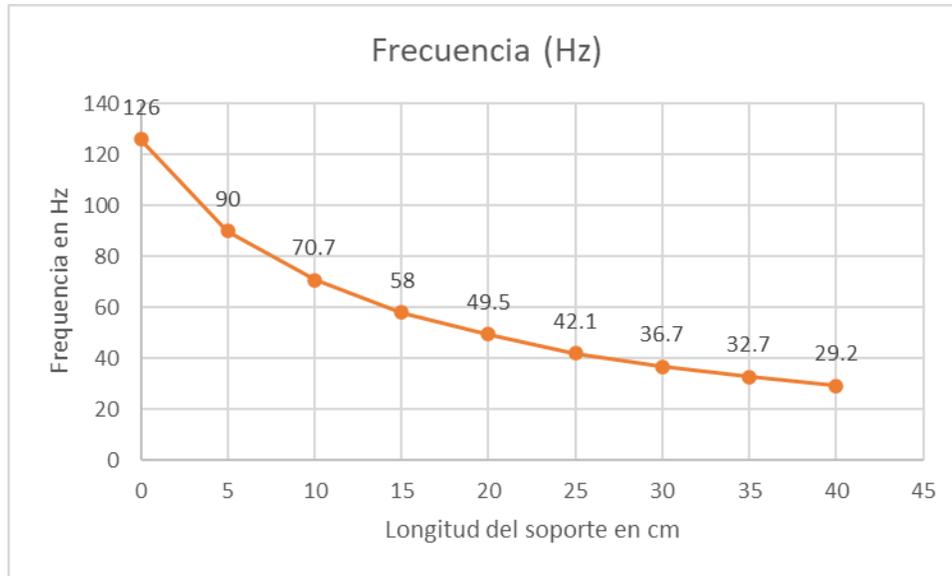


Figura 6.1.2. Gráfica de masa en función de la longitud del poste.

Con el análisis del gráfico de frecuencias de la figura 8.1.2 es posible desarrollar modelos que alineen o aproximen sus frecuencias resonantes con los divisores de la frecuencia de los piezoeléctricos y un múltiplo de la frecuencia del flujo vehicular. Recordando que estos valores son veintisiete kilos Hertz y uno punto cinco kilo Hertz, es posible notar que la longitud de cinco centímetros ya hecha tiene una frecuencia de resonancia de noventa Hertz (ficha técnica mostrada nuevamente en la tabla 6.1.1), adecuada para la optimización, además de desarrollar los modelos mostrados en las tablas 6.1.2 y 6.1.3 con frecuencias de cuarenta y cinco punto un Hertz y treinta punto cinco Hertz. Como es posible notar, los valores de frecuencias de resonancia de las dos piezas nuevas no son el valor esperado porque esto se justifica con el hecho de que estas son dependientes de la longitud y que ciertos cambios en estas medidas podrían ser una complicación para un proceso de manufactura.

La tabla 6.1.1 vuelve a mostrar la ficha técnica de la longitud de poste de cinco centímetros que se ajusta de manera exacta a un valor útil.

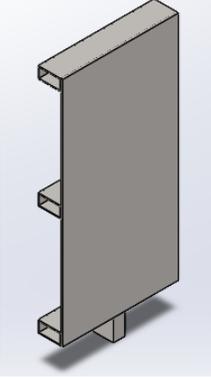
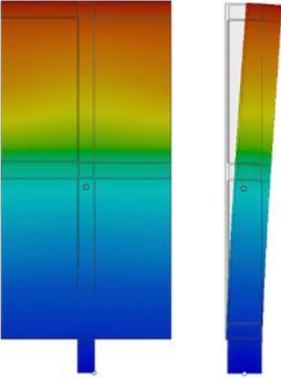
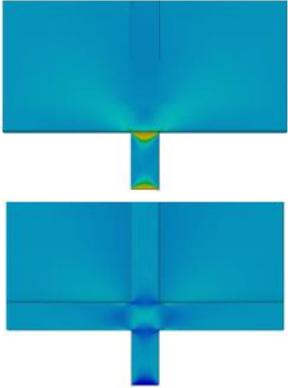
| Modelo | | Desplazamiento | Esfuerzo |
|---|------------------------|---|---|
|  | |  |  |
| Dimensiones | pala:25x50cm poste:5cm | Material | Acero S275N |
| Frecuencia | 90Hz | Masa | 5729g |

Tabla 6.1.1. Ficha técnica modelo cinco centímetros.

La tabla 6.1.2 muestra la ficha técnica del primer modelo propuesto con una longitud de veintitrés centímetros en el poste de soporte, dando como resultado una frecuencia de cuarenta y cinco punto un Hertz.

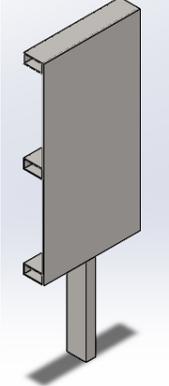
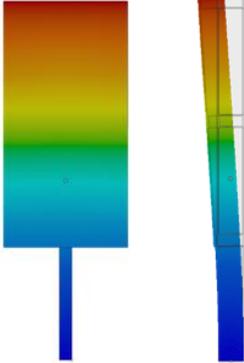
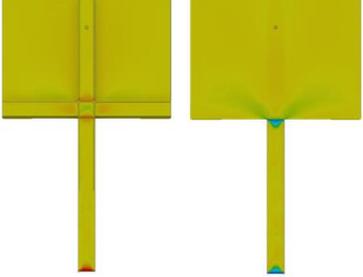
| Modelo | | Desplazamiento | Esfuerzo |
|---|-------------------------|---|--|
|  | |  |  |
| Dimensiones | pala:25x50cm poste:23cm | Material | Acero S275N |
| Frecuencia | 45.1Hz | Masa | 6100g |

Tabla 6.1.2. Ficha técnica modelo veintitrés centímetros.

La tabla 6.1.3 muestra la ficha técnica del segundo modelo propuesto. Con una longitud de treinta y ocho centímetros en el poste del soporte, dando como resultado una frecuencia de treinta punto cinco Hertz.

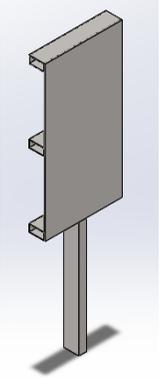
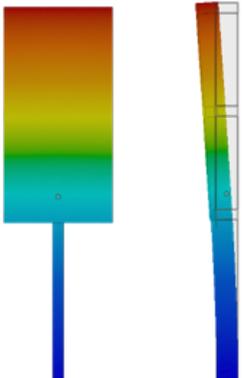
| Modelo | | Desplazamiento | | Esfuerzo | |
|---|-------------------------|---|-------------|--|--|
|  | |  | |  | |
| Dimensiones | pala:25x50cm poste:38cm | Material | Acero S275N | | |
| Frecuencia | 30.5Hz | Masa | 6500g | | |

Tabla 6.1.3. Ficha técnica modelo treinta y ocho centímetros.

La longitud del poste de soporte también debe mantener la placa de captación dentro de un área de trabajo adecuada que preferentemente sea superior a la altura de las llantas del vehículo para coincidir con el volumen de la carrocería. Esta es la razón por la que las dimensiones propuestas en las tablas 6.1.2 y 6.1.3 prioricen la longitud.

6.2.- Modelado

La impresión 3D ya manufacturada, procesada y ensamblada es mostrada en las figuras 6.2.1, 6.2.2 y 6.2.3 donde se incluyen los transductores piezoeléctricos dentro de los conductos de corredera. Este prototipo será útil para futuros experimentos, ya sea en condiciones de laboratorio o en condiciones reales que permitan determinar el adecuado funcionamiento del modelo propuesto o determinar los cambios necesarios para depurar el mismo.

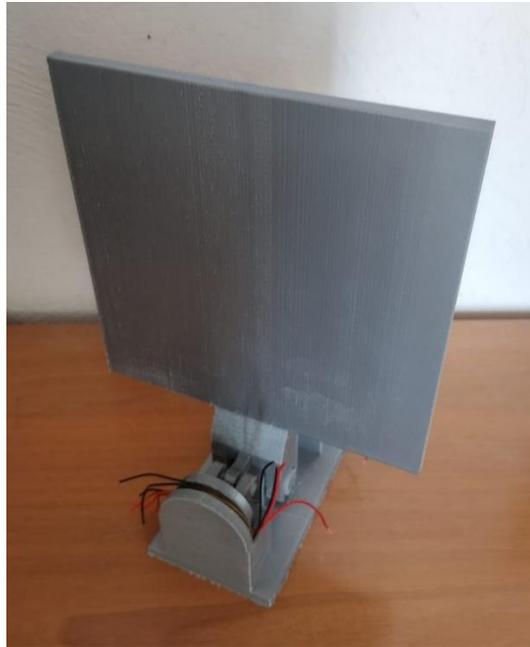


Figura 6.2.1. Prototipo modelo 3D, perspectiva.

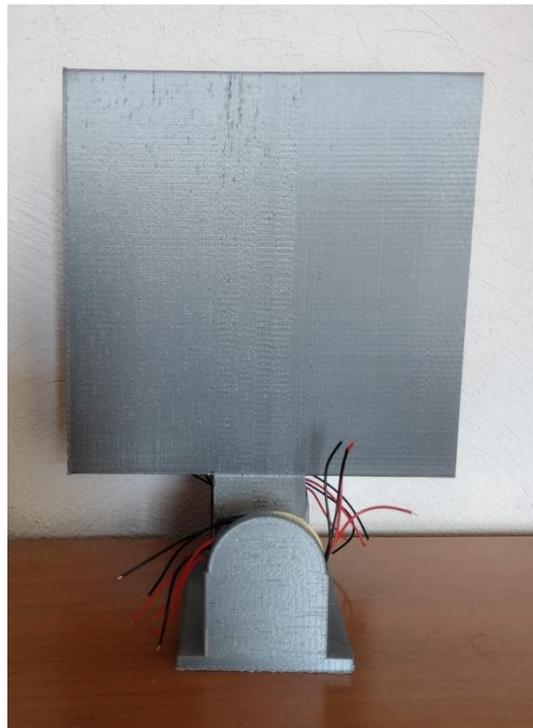


Figura 6.2.2. Prototipo modelo 3D, frente.

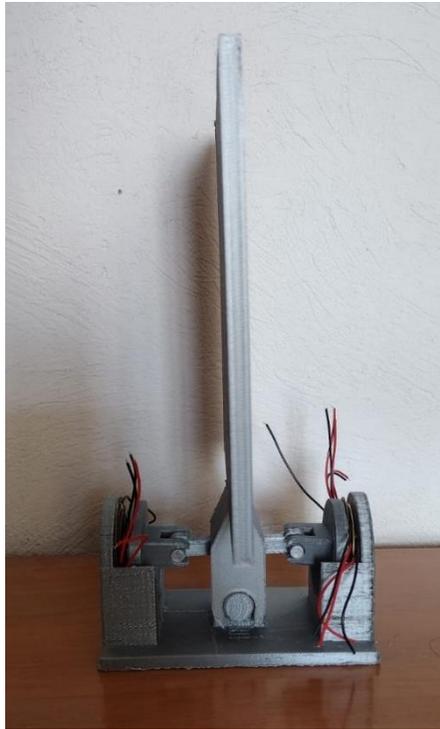


Figura 6.2.3. Prototipo 3D, lateral.

El prototipo fue conectado al osciloscopio y probado en condiciones controladas de laboratorio arrojando las gráficas de la figura 6.2.4. Como es posible observar, los voltajes generados se encuentran en el orden de los quinientos milivoltios, lo que es un valor bajo, aunque se tiene que considerar que se utilizaron ocho piezoeléctricos tipo buzzer conectados en paralelo y que el mecanismo, además de ser un modelo a escala, fue accionado únicamente con soplos. Por lo que se podría asumir que fue una respuesta exitosa. La intención de la prueba no era más que comprobar que el funcionamiento mecánico operara de la manea esperada y que el sistema efectivamente tuviera la capacidad de transferir energía de la presión atmosférica hasta los piezoeléctricos y sin movimiento para no tener pérdidas energéticas, cosa que se consiguió de manera suficiente como para determinar que el funcionamiento dentro del contexto planteado es totalmente viable.

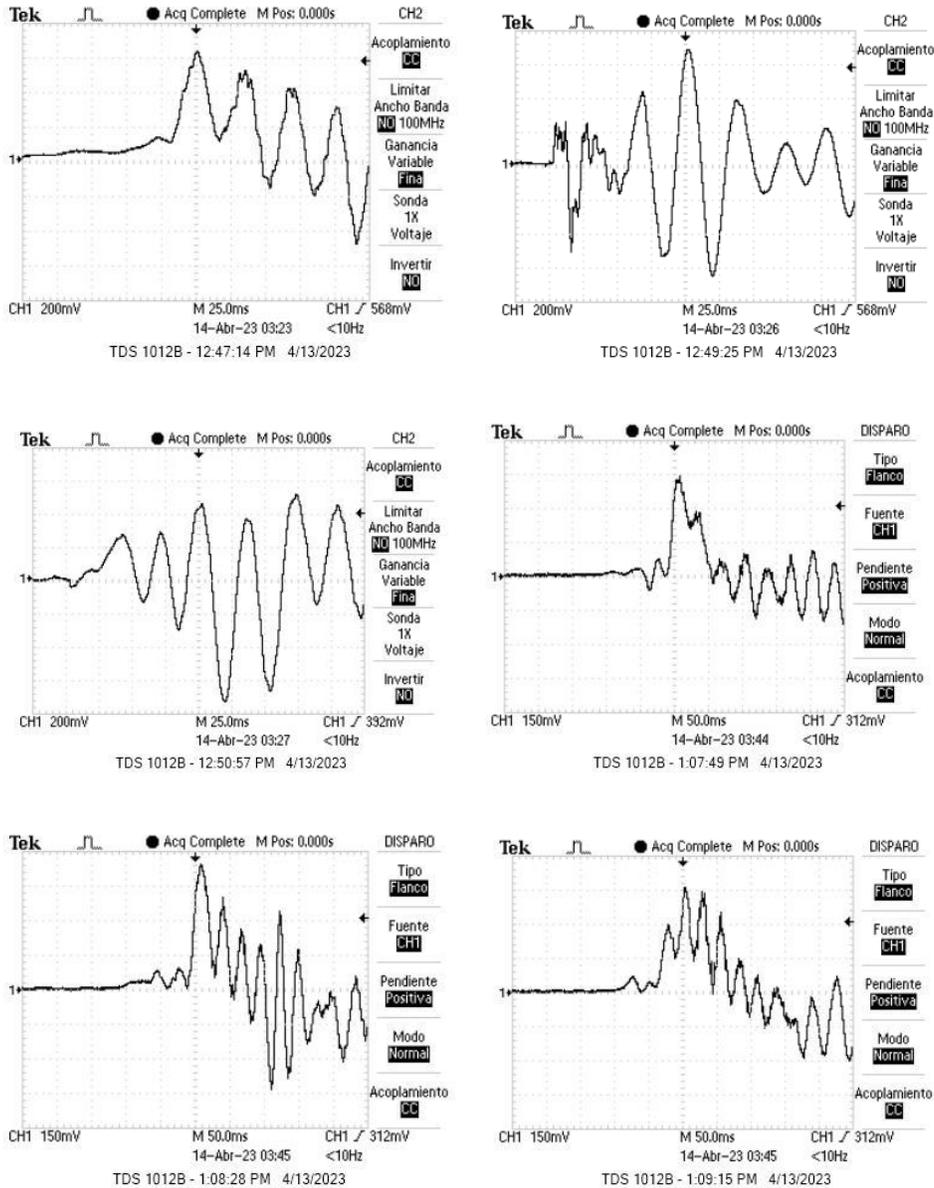


Figura 6.2.4. Mediciones de osciloscopio en prototipo a escala con ocho piezoeléctricos conectados en paralelo y accionado por un soplido humano.

Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones

Como es posible notar, el trabajo no solo desarrolla un modelo, sino que crea una metodología a seguir para replicar y proponer nuevos modelos con propiedades que se ajusten a distintos contextos y aplicaciones. Pese a esto y basado en la investigación desempeñada se puede notar que la tecnología de *Energy Harvesting*

apoyado en piezoeléctricos, se encuentra aún en un estado inicial de su desarrollo y aún tiene mucho camino que avanzar en innovaciones y mejoras hasta que sea una propuesta comercial útil y competitiva.

El desarrollo de nuevos materiales piezoeléctricos es, como ya fue mencionado, un proyecto retador tanto científica como económicamente. Pero que, una vez conseguidos los resultados, los beneficios de la inversión son financieramente redituables dada la escalabilidad de la producción y la diversidad de las aplicaciones. Con la intención de aumentar en el desarrollo de nuevos y mejores materiales, las instituciones de investigación tanto privadas como públicas deberían cooperar en esfuerzos replicando el modelo de Japón a una escala global.

Algo sumamente interesante de la aplicación de los piezoeléctricos en la generación eléctrica es que, como contraparte a su baja potencia, estos tienen un funcionamiento limitado en movimiento y perfectamente ajustable en tamaño para múltiples aplicaciones que implica una revolución prometedora que podría ser descrita como la tecnología de generadores de estado sólido, similar al efecto de los transistores en la computación sustituyendo bulbos de vacío, mejorando la practicidad, escalabilidad, seguridad e incluso eficiencia; entendiendo que estos no utilizan mecanismos como engranajes o bandas transmisoras que implican pérdidas en el aprovechamiento. Un caso claro de la viabilidad de los piezoeléctricos en la industria de la energía no solo en su modelo de *Energy Harvesting* sino como alternativa en aplicaciones específicas son los aerogeneradores Vortex (torres osciladoras diseñadas por una empresa española que aprovechan la resonancia del viento sobre su sistema para producir rendimiento eléctrico más seguro, fácilmente escalable, reducido en mantenimiento).

El proyecto, como es evidente, se sustentó en el uso de herramientas de tecnología que no solo facilitaron los modelos propuestos, sino que íntegramente volvieron posible esta investigación. Pudiendo también concluir que, sin la tecnología contemporánea, el modelado, el análisis mecánico y la manufactura no se hubieran realizado.

Ya entrando de lleno en los resultados del reporte es posible notar que el proceso de diseño se desempeñó de manera ordenada y meticulosa, lo que permitió llegar a un análisis profundo, la creación de una metodología y dar más de un resultado teóricamente funcional. Sin embargo, son notorias las limitantes técnicas del modelo utilizado para ejemplificar el proceso de diseño. Comenzando por el uso de transductores que no están diseñados para la producción eléctrica, por lo que el rendimiento esperado es meramente demostrativo, las características mecánicas de los modelos diseñados y simulados es reducida y, por obviedad, no puede ser un modelo industrializable. Con la intención de mejorar el sistema diseñado se propone que de continuarse la investigación sobre este invento en un futuro con un interés tal vez comercial, se deben considerar piezas piezoeléctricas adecuadas.

Además, es notoria la limitada materialización del proyecto reducido a no más que una maqueta que ejemplifique el funcionamiento sin poner a prueba la operación en condiciones reales como las propuestas. Por lo que, nuevamente, para trabajos que retomem la idea de este invento se puede trabajar de lleno en la implementación de un prototipo y en la corrección de errores funcionales en el mismo para refinar los resultados y tal vez volverlo no solo un proyecto de investigación sino, incluso, un producto interesante para la industria eléctrica.

Es importante, antes de terminar con este documento, recalcar la responsabilidad no solo individual, sino colectiva que las sociedades, gobiernos y empresas por la innovación científica y tecnológica que permita brindar productos y servicios que mejoren la calidad de vida para las personas, la inversión en proyectos que tengan fines ecológicos (como en este caso las energías limpias con la intención de resarcir el impacto negativo que el estilo de vida contemporáneo tiene para el medio ambiente, permitiendo que este estilo de vida se democratice para todos sin representar un desastre incluso de escala apocalíptica como al que nos encaminamos). Y, finalmente, por fomentar el estudio, creatividad e inventiva durante la etapa educativa por los beneficios que esta tiene tanto para la sociedad como para los practicantes.

Bibliografía

A Short History of the Sailing Ship. (s. f.). Google Books.

https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=h-QvjRbK0DAC&oi=fnd&pg=PA17&dq=history+of+sails+of+a+ship&ots=LDNXvP82S6&sig=9T_tkjAljZE9e-hOWRi6sd-8GA4#v=onepage&q=history%20of%20sails%20of%20a%20ship&f=false

Aguilar. (s. f.). *Ciencia de los materiales.* slideshare. Recuperado 12 de marzo de 2023, de <https://es.slideshare.net/DiegoGomez242/ciencia-de-los-materiales-68136046>

Altamirano. (s. f.). *CENCIAS DE LOS MATERIALES SEMANA 3.pptx [PDF]* | Documents Community Sharing. XDOCS. Recuperado 12 de marzo de 2023, de <https://xdocs.pl/doc/cencias-de-los-materiales-semana-3pptx-2855407d7m8x>

Askeland, D. R., & Wright. (2020, 4 marzo). *Ciencia e ingeniería de materiales.* Academia. Recuperado 14 de marzo de 2023, de https://www.academia.edu/42140323/Ciencia_e_ingenieria_de_materia_Askeland_Donald_R_Wright_We_Not_mine_

BBC News Mundo. (2019, 30 marzo). El fabuloso hallazgo que probó la existencia de los míticos barcos descritos por Heródoto en el siglo V a.C. *BBC News Mundo.* <https://www.bbc.com/mundo/noticias-47741643>

Bernal, A., & Orrego, S. (2007). *DISEÑO DEL ALA PARA UN VEHICULO AEREO NO TRIPULADO.* UNIVERSIDAD EAFIT.

Bush, M. B., Nascimento, M. N., Akesson, C. M., Cárdenes-sandí, G. M., Behling, H., Correa-metrio, A., Church, W., Huisman, Kelly, T., Mayle, & Mcmichael, C. N.

- H. (2021, 30 abril). Widespread reforestation before European influence on Amazonia. *Science*. Recuperado 9 de enero de 2023, de <https://www.science.org/doi/10.1126/science.abf3870>
- Cambio climático: ¿Cómo sabemos lo que sabemos?* (s. f.). Climate Change: Vital Signs of the Planet. <https://climate.nasa.gov/en-espanol/datos/evidencia/>
- Candel, N. (2014, 24 septiembre). Rosa de los vientos. *Publicaciones Didácticas*. Recuperado 3 de marzo de 2023, de <https://core.ac.uk/download/pdf/235862698.pdf>
- Chust, C. (2018). *Estudio de viabilidad para la instalación de un parque de energía eólica en la provincia de Alicante* [Tesis]. Universidad Politécnica de Valencia.
- Clark, J. (2020, 28 agosto). *What is the Internet of Things, and how does it work?* IBM Business Transformation Blog. <https://www.ibm.com/blogs/internet-of-things/what-is-the-iot/>
- Colegio Universitario de las Américas. (s. f.). *Efecto piezoeléctrico*. studocu. Recuperado 3 de marzo de 2023, de <https://www.studocu.com/es-mx/document/colegio-universitario-de-las-americas/educacion-fisica/electricsqueeze-images-13nov13-sp/39186814>
- Computer Science at the Chinese International School. (s. f.). *Microprocessors and Input in Control Systems – CS@CIS*. Recuperado 12 de marzo de 2023, de <https://codecishk.com/index.php/topic/microprocessors-and-input-in-control-systems/>
- Córdoba, L. M. (2013). *Estudio de la respuesta piezoeléctrica en PVDF*. Carlos III de Madrid.

- Cruz, J. (2012). *ACTUALIDAD DE MATERIALES PARA LA CAPTACIÓN DE ENERGÍA SOLAR TÉRMICA Y FOTOVOLTAICA* [Tesina]. UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO.
- Da Silva, J. A., & Salas, N. M. (2020). Computational Methodology for the Aerodynamic Design of a HAWT and its Application to Paraguaná Winds. *ResearchGate*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.25076.68480>
- Danish Wind Industry Association. (s. f.). *Pioneros de la energía eólica: el aerogenerador Gedser*. windpower.org. Recuperado 12 de marzo de 2023, de <http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/pictures/juul.htm>
- Diamond, J. (2016). *Armas, germen y acero / Guns, Germs, and Steel: The Fates of Human Societies*. National Geographic Books.
- Ferrán, J. (s. f.). *Estructura cristalina*. Recuperado 12 de marzo de 2023, de <http://materialesti2.blogspot.com/p/estructura.html>
- FÍSICAMENTE HUMANO. (2013, 15 abril). *Ecuación de Bernoulli*. FÍSICAMENTE HUMANO. Recuperado 12 de marzo de 2023, de <https://leoloko90.wordpress.com/fisica-tomo-ii/ecuacion-de-bernoulli/>
- Freepik. (2022, 7 octubre). *Principio de bernoulli, ecuación en dinámica de fluidos Premium Vector*. https://www.freepik.es/vector-premium/principio-bernoulli-ecuacion-dinamica-fluidos_32834770.htm
- Funes, J. F. (2009). *ANÁLISIS SIMPLIFICADO DE LA RESPUESTA ESTRUCTURAL DE UNA PALA DE AEROGENERADOR* [Tesis]. UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID.

- Global Wind Energy Community. (2019). *GWEC | GLOBAL WIND REPORT 2019*.
Recuperado 10 de febrero de 2023, de https://gwec.net/wp-content/uploads/2020/08/Annual-Wind-Report_2019_digital_final_2r.pdf
- Global Wind Energy Community. (2020). *Wind power and green recovery hub*.
Recuperado 10 de febrero de 2023, de <https://gwec.net/green-recovery-data-analysis/>
- Global Wind Energy Community. (2021). *GWEC | GLOBAL WIND REPORT 2021*.
Recuperado 10 de febrero de 2023, de <https://gwec.net/wp-content/uploads/2021/03/GWEC-Global-Wind-Report-2021.pdf>
- Gómez, A. (2018). *GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN*. UNIVERSIDAD DE ALCALÁ.
- Gómez, C.-. E. M. (s. f.). *Laboratorio Curie: el generador piezoeléctrico*. Museo Virtual de la Ciencia del CSIC.
<https://museovirtual.csic.es/csic75/laboratorios/lab1/lab1b.html>
- Harari, Y. N. (2014). *Sapiens*.
- Hinojosa, M. (2000). *La estructura cristalina de los materiales*. UANL.
- History of Piezoelectricity*. (s. f.). PIEZO.COM. <https://piezo.com/pages/history-of-piezoelectricity>
- IoT connected devices worldwide 2019-2030 | Statista*. (2022, 22 noviembre). Statista. <https://www.statista.com/statistics/1183457/iot-connected-devices-worldwide/>
- Johansen, K. (2021). Wind Energy in Denmark: A Short History [History]. *IEEE Power & Energy Magazine*, 19(3), 94-102. <https://doi.org/10.1109/mpe.2021.3057973>

Malmcrona, A. M. (s. f.). *Aplicaciones del efecto piezoeléctrico para la generación de energía*. Carlos III de Madrid.

Martinkova, P., Kostelnik, A., Válek, T., & Pohanka, M. (2017). Main streams in the Construction of Biosensors and Their Applications. *International Journal of Electrochemical Science*, 7386-7403. <https://doi.org/10.20964/2017.08.02>

Mathis, W., Beene, R., & Saul, J. (2022, 25 abril). *Wind Power's 'Colossal Market Failure' Threatens Climate Fight*. Bloomberg.com. <https://www.bloomberg.com/news/articles/2022-04-25/wind-power-s-colossal-market-failure-threatens-climate-fight?leadSource=uverify%20wall>

Maturana, R. A. (s. f.). *Estructuras y esfuerzos mecánicos (Picuino)*. Didactalia: material educativo. Recuperado 12 de marzo de 2023, de <https://didactalia.net/comunidad/materialeducativo/recurso/estructuras-y-esfuerzos-mecanicos-picuino/4e94cd08-5bf2-428b-a8ae-2de83761853c>

Montero, L. M. (2020). Es 2020 y todavía no entendemos del todo por qué los aviones se mantienen en el aire. *Xataka*. <https://www.xataka.com/vehiculos/2020-todavia-no-entendemos-todo-que-aviones-se-mantienen-en-el-aire>

Moragues, J., & Rapallini, A. (2003). *Energía eólica*. Instituto Argentino de la energía.

Mosca, S. (2019). *Estimación de los parámetros operativos de una turbina eólica de baja potencia mediante dinámica de fluidos computacional* [Práctica]. Universidad Tecnológica Nacional.

Online Materials Information Resource - MatWeb. (s. f.). <https://www.matweb.com/>

Oviedo, M. E. S., Castillo, J. R., Márquez, E. B. B., & Delgado, Á. V. (2016).

Aprovechamiento de energía offshore: Avances y perspectivas. *Revista esaica*. <https://doi.org/10.15649/24225126.421>

Pagh, K. (s. f.). *Poul la Cour* [Diapositivas].

https://nmm2014.files.wordpress.com/2014/05/nielsen_poul_la_cour.pdf.

https://nmm2014.files.wordpress.com/2014/05/nielsen_poul_la_cour.pdf

Properties and sublayers of the atmospheric boundary layer, and phenomena which can be investigated in the wind tunnel. (2016, 18 septiembre). Establishment of an Atmospheric Flow Laboratory. Recuperado 12 de marzo de 2023, de https://bmeafl.wordpress.com/jav_hatarreteg_en/

¿Qué es el Internet de las cosas (IoT)? (s. f.). Oracle México.

<https://www.oracle.com/mx/internet-of-things/what-is-iot/>

¿Qué es un transductor? Tipos de transductores y funciones. (2022). *Electrositio*.

<https://electrositio.com/que-es-un-transductor-tipos-de-transductores-y-funciones/>

Ritchie, H. (2022, 27 octubre). *Energy*. Our World in Data.

[https://ourworldindata.org/energy-](https://ourworldindata.org/energy-mix#:~:text=Despite%20producing%20more%20and%20more,in%20the%20last%2010%20years.)

[mix#:~:text=Despite%20producing%20more%20and%20more,in%20the%20last%2010%20years.](https://ourworldindata.org/energy-mix#:~:text=Despite%20producing%20more%20and%20more,in%20the%20last%2010%20years.)

Rojas, A. R. (s. f.). *FUNDAMENTOS AERODINAMICOS DE LAS MAQUINAS*

EOLICAS - Free Download PDF. Nano PDF. Recuperado 12 de marzo de 2023, de https://nanopdf.com/download/ii-fundamentos-aerodinamicos-de-las-maquinas-eolicas_pdf

Rural, A. (2019, 7 mayo). Tubo Venturi para riego. *ABC Color*.

<https://www.abc.com.py/edicion-impres/suplementos/abc-rural/tubo-venturi-para-riego-1261807.html>

Salas, A. D. (2017). *HYDROPHONES BASED ON INTERFEROMETRIC FIBER-OPTIC SENSORS WITH APPLICATIONS IN PHOTOACOUSTICS* [Tesis].
Centro de Investigaciones en Óptica.

Scientific Consensus: Earth's Climate is Warming. (s. f.). Climate Change: Vital Signs of the Planet. <https://climate.nasa.gov/scientific-consensus/>

The Wind Power Story. (s. f.). Google Books.

<https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=uGqkDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP11&dq=history+of+wind+power&ots=Q9YagGSld1&sig=PXGa7bd3gZl2IVQPYMfz6bq3VI8#v=onepage&q=history%20of%20wind%20power&f=false>

Trends in atmospheric concentrations of CO₂ (ppm), CH₄ (ppb) and N₂O (ppb), between 1800 and 2017. (s. f.). European Environment Agency.

[https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/atmospheric-concentration-of-carbon-dioxide-5#tab-chart_5_filters=%7B%22rowFilters%22%3A%7B%7D%3B%22columnFilters%22%3A%7B%22pre_config_polutant%22%3A%5B%22CH4%20\(ppb\)%22%5D%7D%7D](https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/atmospheric-concentration-of-carbon-dioxide-5#tab-chart_5_filters=%7B%22rowFilters%22%3A%7B%7D%3B%22columnFilters%22%3A%7B%22pre_config_polutant%22%3A%5B%22CH4%20(ppb)%22%5D%7D%7D)

UNIGAL. (2022). Tipos de transductor. *UNIGAL.MX*. <https://unigal.mx/tipos-de-transductor/>

United Nations. (s. f.-a). *El Acuerdo de París | Naciones Unidas*.

<https://www.un.org/es/climatechange/paris-agreement>

- United Nations. (s. f.-b). *¿Qué es el cambio climático? | Naciones Unidas*.
<https://www.un.org/es/climatechange/what-is-climate-change>
- Uribe, I. M. (2018). *Valoración del viento como fuente de energía eólica en el estado de Guerrero*. Recuperado 14 de marzo de 2023, de
<https://www.redalyc.org/journal/467/46759491003/html/>
- Vestergaard, J., Brandstrup, L., & Goddard, R. D. (2004). A Brief History of the Wind Turbine Industries in Denmark and the United States. *Academy of International Business (Southeast USA Chapter) Conference Proceedings*.
- Wikimedia Commons. (2014, 27 febrero). *Transición laminar a turbulento*.
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Transicion_laminar_a_turbulento.png
- Wikipedia. (2023a). Sistema cristalino. *Wikipedia, la enciclopedia libre*.
https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_cristalino
- Wikipedia. (2023b). Sustentación. *Wikipedia, la enciclopedia libre*.
<https://es.wikipedia.org/wiki/Sustentaci%C3%B3n>
- Wind Electricity – Analysis - IEA*. (s. f.). IEA. <https://www.iea.org/reports/wind-electricity>
- World Energy Consumption Statistics | Enerdata*. (s. f.).
<https://yearbook.enerdata.net/total-energy/world-consumption-statistics.html>
- Zaragoza. (2018, 25 septiembre). *RETO 7: CREANDO MÚSICA ELECTRÓNICA – ZUMBADOR*. EDUCAR para el CAMBIO. Recuperado 15 de marzo de 2023, de <https://educarparaelcambio.com/arduino/reto-7-creando-musica-electronica-zumbador/>