



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Facultad de Ingeniería

División de Ingeniería Mecánica e Industrial

Laboratorio de Termofluidos

## Aprovechamiento de energía eólica por métodos no convencionales

TESIS PROFESIONAL

para obtener el título de Ingeniero Mecánico

presentan:

Nadine Elena García Morales

Víctor Fernando Ramírez Ulibarri

Para obtener el título de Ingeniero Mecatrónico

Presenta:

Andrés Álvarez Noriega

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Francisco Javier Solorio Ordaz

México D.F., Octubre 2013



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



# ÍNDICE

## Aprovechamiento de energía eólica por métodos no convencionales

|   |    |
|---|----|
| 1. CAPÍTULO I – Introducción.....   | 1  |
| 1.1. Objetivos  | 1  |
| 1.2. Justificación  | 1  |
| 1.3. Metas  | 2  |
| 1.4. Alcances   | 3  |
| 1.5. Hipótesis de trabajo   | 3  |
| 2. CAPÍTULO II – Antecedentes.....  | 4  |
| 2.1. Generalidades  | 4  |
| 2.1.1. Energía eólica   | 4  |
| 2.1.2. Mecánica de Fluidos  | 6  |
| 2.1.3. Electromagnetismo  | 16 |
| 2.1.4. Piezoelectricidad  | 17 |
| 2.2. Estado del arte  | 29 |
| 2.2.1. Sistemas no convencionales para<br>aprovechamiento de energía eólica.      | 29 |
| 2.2.2. Descripción detallada de los dispositivos<br>Seleccionados                 | 39 |
| 2.2.2.1. Aeroflexor   | 39 |
| 2.2.2.2. Piezo-Leaf   | 44 |
| 2.2.2.3. Vibro-Wind   | 47 |
| 3. CAPÍTULO III – Planteamiento del problema.....                                 | 49 |
| 4. CAPÍTULO IV – Construcción de dispositivos de captación de energía eólica..... | 50 |
| 4.1. Banco de pruebas   | 50 |
| 4.2. Aeroflexor   | 53 |
| 4.3. Dispositivos con materiales cerámicos piezoeléctricos                        | 62 |
| 4.3.1. Piezo-Leaf   | 64 |
| 4.3.2. Giro-Wind  | 74 |
| 5. CAPÍTULO V – Resultados.....   | 78 |
| 5.1. Pruebas  | 78 |

|   |     |
|---|-----|
| 5.1.1. Eficiencia Individual  | 78  |
| 5.1.1.1. Aeroflexor   | 78  |
| 5.1.1.2. Dispositivos Piezoeléctricos   | 80  |
| 5.1.2. Eficiencia Colectiva   | 82  |
| 5.1.2.1. Aeroflexor   | 82  |
| 5.1.2.2. Dispositivos Piezoeléctricos   | 83  |
| 5.2. Resultados obtenidos   | 84  |
| 5.2.1. Aeroflexor   | 84  |
| 5.2.2. Piezo-Leaf   | 94  |
| 5.2.3. Giro-Wind  | 114 |
| 5.3. Comparación de los distintos dispositivos  | 125 |
| 6. CAPÍTULO VI – Conclusiones.....  | 127 |
| 6.1. Conclusiones   | 127 |
| 6.2. Recomendaciones y mejoras a futuro   | 130 |
| 7. REFERENCIAS.....   | 132 |
| 7.1. Bibliográficas   | 132 |
| 7.2. En Línea   | 133 |
| 7.3. Patentes   | 134 |
| 7.4. Catálogos comerciales  | 135 |
| 8. APÉNDICE A – Resolución del problema del Aeroflexor<br>analizando directamente los 40 principios de inventiva..... | 135 |

## Nomenclatura

### Mecánica de Fluidos

|                            |   |
|----------------------------|---|
| $U$                        | Velocidad del fluido alejado de una superficie.               |
| $u$                        | Velocidad paralela y muy cercana a una placa.                 |
| $L$                        | Longitud característica.                                      |
| $\mu$                      | Viscosidad.   |
| $\rho$                     | Densidad.   |
| $\nu$                      | Viscosidad cinemática.  |
| $Re$                       | Número de Reynolds.   |
| $Re_x$                     | Número de Reynolds con una longitud característica "x".       |
| $x$                        | Distancia en la dirección del flujo.                          |
| $D$                        | Fuerza de Arrastre.   |
| $L$                        | Fuerza de sustentación.                                       |
| $\eta_{\text{Carnot}}$     | Eficiencia del ciclo de Carnot.                               |
| $T_1$                      | Temperatura suministrada ciclo Carnot.                        |
| $T_2$                      | Temperatura que se libera al ambiente.                        |
| $V_1$                      | Velocidad del viento antes del rotor.                         |
| $V$                        | Velocidad del viento en el rotor.                             |
| $V_2$                      | Velocidad del viento después del rotor.                       |
| $A_1$                      | Área sección transversal de flujo de aire antes de turbina.   |
| $A$                        | Área sección transversal de flujo de aire en el rotor.        |
| $A_2$                      | Área sección transversal de flujo de aire después de turbina. |
| $A_{\text{cv}}$            | Área sección transversal del volumen de control.              |
| $CV$                       | Volumen de control.   |
| $F_{\text{pres}}$          | Fuerza de la presión en el extremo del volumen de control.    |
| $\dot{m}_{\text{lateral}}$ | Flujo másico lateral.   |
| $\dot{m}$                  | Flujo másico  |
| $F$                        | Fuerza aplicada en los alabes debido al viento                |
| $m$                        | Masa  |
| $a$                        | Aceleración   |
| $E$                        | Energía   |
| $P$                        | Potencia  |
| $b$                        | Factor de interferencia del rotor.                            |
| $C_p$                      | Factor de potencia o rendimiento.                             |

### Electromagnetismo

|               |  |
|---------------|--|
| $\varepsilon$ | Fuerza electromotriz inducida.           |
| $\lambda$     | Cambio de flujo concatenado.             |
| $N$           | Número de espiras de material conductor. |
| $\Phi_b$      | Flujo magnético en una espira.           |

## Piezolectricidad

|                    |   |
|--------------------|---|
| P                  | Polarización macroscópica.                    |
| $P_{\text{Micro}}$ | Polarización microscópica.                    |
| E                  | Vector de campo eléctrico.                    |
| $\rho$             | Densidad.                                     |
| $\rho_e$           | Densidad de la carga libre.                   |
| $\pi_i$            | Polarización por unidad de masa.              |
| D                  | Vector de desplazamiento eléctrico.           |
| f                  | Fuerza de cuerpo por unidad de masa.          |
| t                  | Superficie de tracción sobre otra superficie. |
| e                  | Energía interna por unidad de masa.           |

## Materiales cerámicos piezoeléctricos

|   |   |
|---|---|
| k | Coefficiente de acoplamiento electromecánico. |
| d | Constante piezoeléctrica.                     |
| g | Constante piezoeléctrica de voltaje.          |
| K | Constante dieléctrica relativa.               |
| Y | Módulo de elasticidad.                        |
| N | Constante de frecuencia.                      |
| S | Conformidad.                                  |

## Arreglo tipo "Bimorph"

|              |   |
|--------------|---|
| E            | Campo eléctrico.  |
| T            | Esfuerzo.   |
| S            | Tensión.  |
| D            | Desplazamiento dieléctrico.   |
| $\epsilon_r$ | Permisividad relativa o constante dieléctrica.                                      |
| $\epsilon_0$ | Permisividad del vacío ( $8.85 \times 10^{-12} \left[ \frac{F}{m} \right]$ ).       |
| $\epsilon_T$ | Permisividad bajo un esfuerzo constante.  |
| $f_r$        | Frecuencia de resonancia.   |
| N            | Constante de frecuencia.  |
| L            | Largo de la placa.  |
| W            | Ancho de la placa.  |
| thk          | Espesor de la placa.  |
| C            | Capacitancia.   |
| K            | Constante dieléctrica relativa.   |
| d            | Constante piezoeléctrica.   |
| V            | Voltaje aplicado / Voltaje inducido.  |
| g            | Constante piezoeléctrica de voltaje. (campo de circuito abierto/esfuerzo aplicado). |
| F            | Fuerza aplicada.  |
| $\Delta$     | Deflexión   |

## Lista de Tablas

### CAPÍTULO IV

|                |   |
|----------------|---|
| Tabla 4.2.1    | Relación de longitudes “c” y “l” para el ala del Aeroflexor.                                |
| Tabla 4.2.2    | Dimensiones de las alas probadas para el Aeroflexor.  |
| Tabla 4.2.3    | Factores estudiados para determinar las dimensiones del Aeroflexor.                         |
| Tabla 4.3.1    | Características del piezoeléctrico PZT 5A1 utilizado.                                       |
| Tabla 4.3.1.1  | Brazo de palanca rectangular hecho de Alucobond® de 100 [mm].                               |
| Tabla 4.3.1.2  | Brazo de palanca rectangular hecho de Alucobond® de 150 [mm].                               |
| Tabla 4.3.1.3  | Brazo de palanca rectangular hecho de Alucobond® de 170 [mm].                               |
| Tabla 4.3.1.4  | Brazo de palanca delgado hecho de Alucobond® de 100 [mm].                                   |
| Tabla 4.3.1.5  | Brazo de palanca delgado hecho de Alucobond® de 150 [mm].                                   |
| Tabla 4.3.1.6  | Brazo de palanca delgado hecho de Alucobond® de 170 [mm].                                   |
| Tabla 4.3.1.7  | Triángulo 50 [mm] hecho con PVC espumado.   |
| Tabla 4.3.1.8  | Triángulo 75 [mm] hecho con PVC espumado.   |
| Tabla 4.3.1.9  | Triángulo 100 [mm] hecho con PVC espumado.  |
| Tabla 4.3.1.10 | Combinaciones de arreglos probados para el Piezo-Leaf.                                      |
| Tabla 4.3.1.11 | Voltajes estáticos y frecuencias óptimas para las combinaciones de arreglos del Piezo-Leaf. |

### CAPÍTULO V

|                 |  |
|-----------------|--|
| Tabla 5.2.1.1   | Condiciones del aire en el laboratorio durante las pruebas del Aeroflexor.                     |
| Tabla 5.2.1.1.1 | Resultados obtenidos para la prueba de tipo eléctrica de eficiencia individual del Aeroflexor. |
| Tabla 5.2.1.1.2 | Potencia eléctrica obtenida para la prueba de eficiencia individual del Aeroflexor.            |
| Tabla 5.2.1.1.3 | Obtención del coeficiente de potencia del Aeroflexor de forma meramente aerodinámica.          |
| Tabla 5.2.1.1.4 | Eficiencia individual del Aeroflexor para la parte mecánica.                                   |
| Tabla 5.2.1.1.5 | Obtención del coeficiente de potencia de la prueba mecánica del Aeroflexor.                    |
| Tabla 5.2.1.2.1 | Pruebas de eficiencia colectiva para la parte mecánica en el Aeroflexor.                       |
| Tabla 5.2.1.2.2 | Resultados de las pruebas de eficiencia colectiva de la parte mecánica del Aeroflexor.         |
| Tabla 5.2.2.1   | Condiciones del aire en el laboratorio durante las pruebas del Piezo-Leaf.                     |
| Tabla 5.2.2.2   | Brazo de palanca rectangular de 100 [mm] hecho con Alucobond®.                                 |



|                |  |
|----------------|--|
| Tabla 5.2.2.3  | Brazo de palanca delgado de 100 [mm] hecho con Alucobond®.   |
| Tabla 5.2.2.4  | Brazo de palanca rectangular de 150 [mm] hecho con Alucobond®.   |
| Tabla 5.2.2.5  | Brazo de palanca delgado de 150 [mm] hecho con Alucobond®.   |
| Tabla 5.2.2.6  | Brazo de palanca rectangular de 170 [mm] hecho con Alucobond®.   |
| Tabla 5.2.2.7  | Brazo de palanca delgado de 170 [mm] hecho con Alucobond®.   |
| Tabla 5.2.2.8  | Resultados obtenidos para el brazo de palanca rectangular 100 [mm] hecho con Alucobond®.                                   |
| Tabla 5.2.2.9  | Resultados obtenidos para el brazo de palanca delgado 100 [mm] hecho con Alucobond®.                                       |
| Tabla 5.2.2.10 | Resultados obtenidos para el brazo de palanca rectangular 150 [mm] hecho con Alucobond®.                                   |
| Tabla 5.2.2.11 | Resultados obtenidos para el brazo de palanca delgado 150 [mm] hecho con Alucobond®.                                       |
| Tabla 5.2.2.12 | Resultados obtenidos para el brazo de palanca rectangular 170 [mm] hecho con Alucobond®.                                   |
| Tabla 5.2.2.13 | Resultados obtenidos para el brazo de palanca delgado 170 [mm] hecho con Alucobond®.                                       |
| Tabla 5.2.2.14 | Condiciones del aire en el laboratorio durante las pruebas del Piezo-Leaf para diferentes ángulos de incidencia.           |
| Tabla 5.2.2.15 | Prueba de diferentes ángulos de incidencia para el brazo de palanca rectangular de 100 [mm] y punta triangular de 50 [mm]. |
| Tabla 5.2.2.16 | Prueba de diferentes ángulos de incidencia para el brazo de palanca delgado de 100 [mm] y punta triangular de 50 [mm].     |
| Tabla 5.2.2.17 | Condiciones del aire en el laboratorio durante las pruebas de eficiencia colectiva del Piezo-Leaf.                         |
| Tabla 5.2.2.18 | Resultados obtenidos de la prueba de eficiencia colectiva para el Piezo-Leaf.  |
| Tabla 5.2.3.1  | Condiciones del aire en el laboratorio durante las pruebas realizadas al Giro-Wind.  |
| Tabla 5.2.3.2  | Voltajes obtenidos en la prueba de eficiencia individual del Giro-Wind para la configuración en cubo.                      |
| Tabla 5.2.3.3  | Voltajes obtenidos en la prueba de eficiencia individual del Giro-Wind para la configuración en rombo.                     |
| Tabla 5.2.3.4  | Resultados obtenidos en la prueba de eficiencia individual del Giro-Wind para la configuración en cubo.                    |
| Tabla 5.2.3.5  | Resultados obtenidos en la prueba de eficiencia individual del Giro-Wind para la configuración en rombo.                   |
| Tabla 5.2.3.6  | Datos obtenidos de la prueba de eficiencia colectiva para el dispositivo Giro-Wind.  |

## Lista de Figuras

### CAPÍTULO II

- Fig. 2.1.2.1 Comparación de un flujo pasando alrededor de una placa puntiaguda. [13]
- Fig. 2.1.2.2 Consideraciones del flujo antes y después del dispositivo estudiado para el Teorema de Betz. [23]
- Fig. 2.1.2.3 Volumen de control circular alrededor de una turbina eólica. [7]
- Fig. 2.1.2.4 Volumen de control alternativo alrededor de una turbina eólica. [7]
- Fig. 2.1.2.5 Gráfica del coeficiente de eficiencia o potencia ( $C_p$ ) contra el parámetro de interferencia ( $b$ ). [8]
- Fig. 2.1.4.1 Polarización microscópica. [14]
- Fig. 2.1.4.2 Efecto piezoeléctrico, directo y converso. [14]
- Fig. 2.1.4.3 Microestructura de un piezoeléctrico. Origen del efecto piezoeléctrico directo. [14]
- Fig. 2.1.4.4 Propiedades de los materiales piezoeléctricos. [31]
- Fig. 2.1.4.5 Propiedades del piezoeléctrico de tipo cerámico PZT 5A1 empleado. [31]
- Fig. 2.2.1.1.1 Zona del Wind-Belt en la que se ubica el imán entre el arreglo de las bobinas. [26]
- Fig. 2.2.1.2.1 Imágenes de prototipo Windsatlk propuesto para un concurso de ciudad autosustentable en los suburbios de Abu Dhabi. [22]
- Fig. 2.2.1.3.1 Arreglo de Vibro-Wind colocados en tejados para pruebas con corrientes de viento reales. [19]
- Fig. 2.2.1.4.1 Concepto inicial del Piezo-Leaf y muestra de un prototipo. [20]
- Fig. 2.2.1.5.1 Prototipo de MARS en su etapa de pruebas en Canadá. [24]
- Fig. 2.2.1.6.1 Imágenes descriptivas de la patente de “Bladeless Wind Power Generator”. [30]
- Fig. 2.2.1.7.1 Imagen del arreglo “Wind Energy Generators Using Piezoelectric Material and Auxiliary Mechanism Thereof”. [29]
- Fig. 2.2.1.8.1 Figura esquemática del “Wind Power Generator and Velocimeter”, en donde se puede apreciar la colocación de los piezoeléctricos y los vórtices que los deforman. [27]
- Fig. 2.2.1.9.1 Modelo de Aeroflexor. [19]
- Fig. 2.2.2.1.1 Componentes del Aeroflexor acoplado a un generador.
- Fig. 2.2.2.1.2 Fuerzas presentes en el arreglo Aeroflexor sometido a una corriente de aire.
- Fig. 2.2.2.1.3 Fuerzas aprovechadas por el Aeroflexor cuando se encuentra sometido a la incidencia de una corriente de aire.

- Fig. 2.2.2.1.4 Dinamómetro colocado en el extremo inferior del ala del Aeroflexor.
- Fig. 2.2.2.1.5 Forma de las gráficas de la fuerza registrada en el dinamómetro con respecto a la distancia desplazada y con respecto al tiempo.
- Fig. 2.2.2.1.6 Componentes del Aeroflexor y fuerzas involucradas en ellos.
- Fig. 2.2.2.2.1 Se muestran las clases de vórtices observados en cuerpos prismáticos de diferente longitud. [3]
- Fig. 2.2.2.2.2 Componentes del arreglo Piezo-Leaf. [19]
- Fig. 2.2.2.3.1 Componentes del arreglo Vibro-Wind. [21]

#### CAPÍTULO IV

- Fig. 4.1.1 Base principal para pruebas en el túnel de viento.
- Fig. 4.1.2 Base circular que permite el giro de la estructura para la prueba de Giro-Wind y Piezo-Leaf.
- Fig. 4.1.3 Arreglo para las pruebas de Giro-Wind y Piezo-Leaf.
- Fig. 4.1.4 Imagen de los lugares donde se barrenó la base secundaria para poder sujetar el Aeroflexor.
- Fig. 4.2.1 Esquema del ala del dispositivo Aeroflexor.
- Fig. 4.2.2 Componentes del arreglo Aeroflexor acoplado a un dinamómetro.
- Fig. 4.2.3 Componentes del arreglo Aeroflexor acoplado a un motor eléctrico como generador.
- Fig. 4.2.4 Diagrama de fuerzas presentes en el Aeroflexor.
- Fig. 4.2.5 Frecuencia de giro contra velocidad del viento en el Aeroflexor.
- Fig. 4.2.6 Fuerza contra velocidad del viento en el Aeroflexor.
- Fig. 4.3.1 Dimensiones del bimorph PZT 5A1 utilizado.
- Fig. 4.3.2 Diseño CAD del Piezo-Leaf utilizado en las pruebas.
- Fig. 4.3.3 a) Geometría de brazo de palanca rectangular y b) geometría de brazo de palanca delgado.
- Fig. 4.3.4 Geometría triangular empleada en la punta del dispositivo Piezo-Leaf.
- Fig. 4.3.2.1 Primera configuración probada.
- Fig. 4.3.2.2 Segunda configuración probada.
- Fig. 4.3.2.3 Tercera configuración probada.
- Fig. 4.3.2.4 Cuarta configuración probada.
- Fig. 4.3.2.5 Diseño de la estructura analizada.
- Fig. 4.3.2.6 Perfil oscilatorio probado en la tercera configuración.

#### CAPÍTULO V

- Fig. 5.1.1.1.1 Esquema de la colocación del Aeroflexor en el túnel de viento y ubicación de las tomas de velocidad de viento posteriores al dispositivo.

- Fig. 5.1.1.1.2 Longitudes “r” y “s” medidas en el paso seis de la prueba mecánica del Aeroflexor.
- Fig. 5.2.1.1.1 Coeficiente de potencia contra velocidad del viento para el Aeroflexor, calculado de forma meramente aerodinámica.
- Fig. 5.2.1.1.2 Coeficiente de potencia contra velocidad del viento para el Aeroflexor, calculado con los datos de la prueba mecánica.
- Fig. 5.2.1.1.3 Comparación de las potencias medidas, eléctrica y mecánica, para las diferentes velocidades analizadas.
- Fig. 5.2.1.1.4 Potencia eléctrica obtenida con el Aeroflexor acoplado a un motor eléctrico como generador.
- Fig. 5.2.1.1.5 Comparación del coeficiente de potencia obtenido contra la curva del coeficiente de potencia.
- Fig. 5.2.2.1 Arreglo Piezo-Leaf en la estructura metálica para las pruebas en el túnel de viento.
- Fig. 5.2.2.2 Comparación de la potencia eléctrica obtenida para los diferentes arreglos de brazos de palanca de 100 [mm].
- Fig. 5.2.2.3 Comparación de potencia eléctrica obtenida para los diferentes arreglos de brazos de palanca de 150 [mm].
- Fig. 5.2.2.4 Comparación de la potencia eléctrica obtenida para los diferentes arreglos de brazos de palanca de 170 [mm].
- Fig. 5.2.2.5 Potencia eléctrica contra velocidad del viento anterior al dispositivo para los diferentes arreglos de Piezo-Leaf con brazo de palanca rectangular y punta triangular de 100 [mm].
- Fig. 5.2.2.6 Potencia eléctrica contra velocidad del viento anterior al dispositivo para los diferentes arreglos de Piezo-Leaf con brazo de palanca delgado y punta triangular de 100 [mm].
- Fig. 5.2.2.7 Comparación del funcionamiento del Piezo-Leaf con la curva de coeficiente de potencia.
- Fig. 5.2.2.8 Arreglos Piezo-Leaf probados para diferentes ángulos de incidencia de la corriente de viento.
- Fig. 5.2.2.9 Cambio en el área efectiva del viento para diferentes ángulos de incidencia. Izquierda: ángulo de incidencia 0°, derecha: ángulo de incidencia 90°.
- Fig. 5.2.2.10 Potencia eléctrica obtenida contra velocidad del viento para diferentes ángulos de incidencia.
- Fig. 5.2.2.11 Coeficiente de potencia contra velocidad del viento para diferentes ángulos de incidencia.
- Fig. 5.2.2.12 Arreglo Piezo-Leaf para medir la influencia de otros dispositivos en el plano vertical.
- Fig. 5.2.2.13 Potencia eléctrica contra velocidad del viento para diferentes distancias entre dispositivos Piezo-Leaf.

- Fig. 5.2.2.14 Coeficiente de potencia contra velocidad inicial del viento para diferentes distancias entre dispositivos Piezo-Leaf.
- Fig. 5.2.3.1 Potencia eléctrica contra velocidad del viento para diferentes longitudes de brazo de palanca en la configuración de cubo.
- Fig. 5.2.3.2 Potencia eléctrica contra velocidad del viento para diferentes longitudes de brazo de palanca en la configuración de rombo.
- Fig. 5.2.3.3 Geometría del cubo con triángulo superpuesto empleada en el dispositivo Giro-Wind y que se utilizó para calcular el área efectiva de dicho dispositivo.
- Fig. 5.2.3.4 Coeficiente de potencia contra velocidad del viento para la configuración en cubo.
- Fig. 5.2.3.5 Geometría formada por la revolución del arreglo Giro-Wind en configuración en rombo.
- Fig. 5.2.3.6 Coeficiente de potencia contra velocidad del viento para la configuración en rombo.
- Fig. 5.2.3.7 Comparación del coeficiente de potencia del Giro-Wind con respecto a la curva de coeficiente de potencia.
- Fig. 5.2.3.8 Arreglo de Giro-Wind para la prueba de eficiencia colectiva.
- Fig. 5.2.3.9 Potencia eléctrica contra velocidad del viento para diferentes distancias entre dispositivos Giro-Wind.
- Fig. 5.2.3.10 Coeficiente de potencia contra velocidad del viento para diferentes distancias entre dispositivos Giro-Wind.
- Fig. 5.3.1 Comparación del coeficiente de potencia de los dispositivos estudiados con la curva del coeficiente de potencia.
- Fig. 5.3.2 Ampliación de la zona en la que se encuentran los coeficientes de potencia de los dispositivos estudiados. Gráfica proveniente de la Fig. 5.3.1.

## APÉNDICE A

- Fig. A.1 Modificación propuesta al mecanismo del Aeroflexor.

# 1. CAPÍTULO I – Introducción

*Presentación del trabajo y de los lineamientos que se seguirán a lo largo del desarrollo del mismo. Estableciéndose objetivos a alcanzar, la razón por la que se realiza esta investigación, las metas a cumplir, los alcances que tiene el trabajo y la información que se espera obtener de él.*

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1. Objetivo principal

Explorar métodos alternativos de captación de energía eólica mediante dispositivos cuyo principio de funcionamiento no esté basado en el uso de turbinas.

### 1.1.2. Objetivos particulares

Construir tres diferentes modelos a escala, con ciertos parámetros de funcionamiento comunes que permitan realizar una comparación directa entre ellos. Introducirlos al túnel de viento para obtener sus características de funcionamiento.

Obtener un sustento teórico-práctico que de pie a futuras investigaciones y desarrollos posteriores.

Conocer la energía que es capaz de producir cada arreglo en condiciones de funcionamiento similares, obteniendo sus eficiencias.

Indicar la densidad de dispositivos máxima para la cual el funcionamiento de los mismos sigue siendo adecuado.

Analizar con los datos obtenidos la viabilidad de operación de los dispositivos en zonas urbanas.

## 1.2. Justificación

En las zonas urbanas y a bajas alturas las características del viento, principalmente su velocidad, provocan que su captación y posterior transformación sea menos eficiente hasta el punto donde es inviable. La instalación de turbinas eólicas convencionales en estas zonas, ya sean de eje horizontal o vertical, requiere de adecuaciones especiales que se reflejan en la inversión que requieren.

Aunado a lo anterior, estas turbinas presentan una gran cantidad de vibraciones que pueden llegar a debilitar y comprometer la estructura que las sostiene, aumentando la

necesidad de mantenimientos minuciosos, por lo que en las zonas urbanas no pueden ser instaladas en cualquier edificio.

En lo referente a la contaminación audiovisual también generan altos impactos en el entorno donde se coloquen, independientemente de que las zonas urbanas ya estén afectadas, su instalación aumentará dicho impacto negativo en la población.

Las interferencias electromagnéticas provocadas por el movimiento, los materiales y los generadores eléctricos de estos arreglos generan perturbaciones considerables en los funcionamientos de dispositivos de telecomunicaciones y de navegación. En las zonas urbanas esto puede llegar a ser crítico.

Finalmente, las turbinas eólicas convencionales tienen un impacto negativo en la fauna de la zona donde estén ubicadas, principalmente en los procesos migratorios de las aves y mariposas, y en la orientación de los murciélagos.

Para mitigar algunos de los inconvenientes anteriores fueron propuestas las turbinas eólicas de eje vertical, las cuales son más factibles de instalar en zonas urbanas. Sin embargo, siguen presentando problemas en las estructuras como consecuencia de vibraciones, afecciones audiovisuales e incluso de interferencia electromagnética, aunque en menor medida.

Los sistemas no convencionales, que pueden involucrar arreglos de imanes y bobinas, o piezoeléctricos como medios para obtener una corriente eléctrica y una diferencia de voltaje, pueden llegar a convertirse en métodos de obtención de energía eólica aplicables en circunstancias en las que las turbinas, ya sea de eje vertical u horizontal, no pueden ser instaladas o tendrían una eficiencia que las haría inviables. Lo que se busca con este proyecto de investigación es conocer la posibilidad real de que se instalaran este tipo de dispositivos para satisfacer necesidades energéticas básicas, pero de requerimientos de corriente y voltaje bajos, al menos en la etapa inicial de la investigación. Siendo interesante también su exploración como elementos que generen energía eléctrica para otro tipo de aplicaciones si se aumentara la densidad de dispositivos en un área determinada.

### **1.3. Metas**

Generar tres propuestas de dispositivos de captación de energía eólica cuyo principio de funcionamiento no esté basado en elementos giratorios como los de las turbinas convencionales.

Caracterizar su funcionamiento bajo diversas circunstancias y determinar su viabilidad en zonas urbanas y en zonas donde las turbinas eólicas, de eje vertical y horizontal, no sean factibles.

Se determinará la geometría y las características de funcionamiento de tres diferentes arreglos, que se pudieran instalar de forma segura en zonas o edificios no adecuados para otro tipo de infraestructuras de energías alternativas.

#### **1.4. Alcances**

Diseñar y construir tres diferentes dispositivos de captación de energía eólica a escala, para introducirlos en el túnel de viento y comparar sus características de funcionamiento para ciertos parámetros establecidos. Determinar sus eficiencias, seleccionar y recomendar uno de los dispositivos por si en algún momento se quiere implementar un arreglo de este tipo de equipos.

#### **1.5. Hipótesis de trabajo**

Los dispositivos de aprovechamiento de energía eólica no convencionales que serán diseñados y caracterizados, permitirán conocer la factibilidad de su aplicación en condiciones de funcionamiento en zonas urbanas y a mayor escala.



## 2. CAPÍTULO II – Antecedentes

*Explicación breve acerca de la energía eólica y cómo se puede aprovechar, qué son la mecánica de fluidos, el electromagnetismo y la piezoelectricidad, principios que se emplearon en el trabajo para diseñar y analizar los dispositivos.*

*Presentación del estado del arte de las investigaciones relacionadas con energía eólica no convencional en el mundo, de forma que se comprendan y establezcan fácilmente las bases de la dirección que tomó la investigación realizada.*

### 2.1 Generalidades

#### 2.1.1. Energía eólica

La energía eólica es la energía cinética extraída del viento. Ésta se transduce en otras formas útiles para las actividades humanas, principalmente en energía eléctrica. Para su explotación, el viento se expresa por su velocidad y su densidad. Desde las primeras civilizaciones la captación de energía de un flujo de aire a través de rotores ha dado buenos resultados al permitir acoplarse directamente a una flecha y así concentrar este tipo de energía. Las turbinas son los dispositivos convencionales de captación de energía eólica y de acuerdo con [8] se componen de:

##### Rotor

Elemento encargado de extraer la energía cinética del aire a través de sus propiedades aerodinámicas y dinámicas para provocar torque. La aerodinámica del rotor determinará si el dispositivo capta la energía del aire a través de fuerzas de arrastre o de sustentación.

##### Transmisiones mecánicas

La principal de ellas regula la conexión entre el rotor y el generador modificando la velocidad de rotación de entrada para obtener la corriente con la frecuencia deseada, por lo regular aumentará la velocidad de entrada y buscará hacerla constante. Existen otras transmisiones encargadas del movimiento del rotor y sus elementos y estas fungen como elementos de control de velocidad del rotor.

##### Sistema eléctrico

Engloba tanto el generador como los sensores, procesadores y actuadores que conforman el sistema de control de la turbina.

Haciendo referencia a [6] la función de una turbina moderna es generar electricidad de gran calidad a la frecuencia de la red eléctrica teniendo poco mantenimiento durante un ciclo de vida de 20 años. En otras palabras, cada turbina debería funcionar

como una pequeña estación de poder automática e independiente mediante un sistema de control.

Debido a la disposición espacial de esos elementos y el diseño del rotor, las turbinas se dividen en turbinas de eje vertical y turbinas de eje horizontal. Dichas diferencias reflejan valores distintos de potencia y densidad, definiéndose ésta última como la cantidad máxima de turbinas cuyo funcionamiento continua siendo adecuado, por unidad de área determinada. En este caso el concepto de densidad se definirá como el espaciamiento necesario para que más de una unidad opere sin verse afectada por la otra. Por ejemplo, de acuerdo con [17] en una granja eólica la distancia entre una turbina y otra debe de ser entre 3 a 10 veces el diámetro del rotor. Durante mucho tiempo ha existido una marcada superioridad en el desarrollo de turbinas de eje horizontal debido al avance tecnológico que se tiene en el diseño de propelas.

En [6] se establece que actualmente las velocidades de aire promedio en áreas explotables va de 5 [m/s] a 11 [m/s], sin embargo los captadores de energía deberán soportar los picos registrados en la localidad dónde serán ubicados. Las áreas viables para este tipo de explotación pueden determinarse por medio de un atlas de viento. Hasta el momento las granjas eólicas han sido dispuestas en zonas rurales e incluso en el mar, ya que tanto las características del viento como los espacios ofrecen grandes bondades; sin embargo la fauna y flora de dichos ecosistemas se ha visto dañada entre otras disconformidades. Lo anterior describe uno de los motivos por lo que se ha buscado llevar estos captadores a regiones urbanas, donde por supuesto existen otras desventajas.

En [15] se habla de que hoy en día las turbinas dispuestas en ciudades tienen dimensiones bastante pequeñas en comparación con las rurales y producen en su mayoría entre 1 y 20 [kW]. Por el momento no pretenden sustituir a las grandes granjas eólicas sino contribuir a la generación de energía renovable. En países como E.E.U.U., Canadá y Brasil, así como en continente europeo en general, han mostrado contribuciones significantes. En Europa el proyecto WINEUR (Wind Energy Integration in the Urban Environment) permite el acceso a información tecnológica para integrar las pequeñas turbinas a las zonas urbanas. En un documento que enuncia la reglamentación para colocar turbinas en edificios se remarca que ya que las turbinas urbanas por lo regular se colocan en los techos o en la vía pública se deberán de colocar a una altura adecuada y asegurar que su ambiente (edificio y alrededores) no presente riesgos estructurales ni se vea afectado por altos impactos visuales.

Como se mencionó anteriormente, la localización de turbinas urbanas se ha restringido a techos de edificios y el piso. Pocos proyectos como el edificio en San Francisco de la Comisión de Utilidades Públicas [16] y la propuesta innovadora de un Modelo de Torre de Viento generado por el Dr. Majid Rashidi [24], profesor de la Universidad del estado de Cleveland, integran las turbinas en el mismo edificio. El buscar distintos diseños de captadores de aire podrá traer ventajas para poder aprovechar una mayor cantidad de localidades urbanas y no encerrarnos en las turbinas, las cuales no fueron diseñadas inicialmente para las ciudades actuales.

### 2.1.2. Mecánica de fluidos

La mecánica de fluidos es la rama de la física que se encarga del estudio de los fluidos en movimiento o en reposo y los efectos de la interacción de éstos con objetos sólidos o con otros fluidos.

Existen distintas definiciones para el concepto de fluido, desde la más sencilla: es un material que adopta la forma del recipiente que lo contiene, hasta un poco más compleja: son los materiales cuyas moléculas tienen fuerzas de atracción débiles o nulas. La definición que nos sirve mejor en la ingeniería nos dice que es un material que se deforma continuamente bajo la acción de un esfuerzo cortante.

#### Número de Reynolds

El número de Reynolds es un parámetro adimensional de suma importancia para la mecánica de fluidos, haya o no superficie libre, ya que determina el comportamiento de los fluidos Newtonianos y su efecto sólo puede ser despreciado fuera de las regiones donde hay gradientes grandes de velocidad

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu} = \frac{UL}{\nu} = \frac{\text{inercia del fluido}}{\text{viscosidad del fluido}} \quad (2.1.2.1)$$

Donde U y L son la velocidad y la longitud característica del fluido.

Mientras que los parámetros debidos al fluido son  $\mu$  (viscosidad) y  $\rho$  (densidad), los cuales están relacionados por medio de un cociente conocido como viscosidad cinemática:

$$\nu = \frac{\rho}{\mu} \quad (2.1.2.2)$$

Lo primero que se debe estimar al analizar un flujo, es el número de Reynolds, por ejemplo al encontrar que este valor es muy pequeño para un flujo externo, podemos asegurar que el fluido es muy viscoso y se mueve a baja velocidad, así mismo si obtenemos un valor moderado ( $10^3 < Re_x < 10^6$ ) tenemos un comportamiento conocido como flujo laminar en el cual se tiene un gradiente de velocidad muy bajo, la fuerza de inercia es despreciable, las partículas se deslizan y rotan, se tiene un movimiento del fluido como láminas o líneas de corriente ordenadas las cuales no se mezclan unas con otras, por lo cual dichas líneas permanecen paralelas al flujo con velocidad U y conservan su trayectoria. Por otro lado, si el valor es muy grande ( $10^6 < Re_x$ ) se tiene un flujo turbulento en el cual se presentan fuertes fluctuaciones de las líneas de corriente de manera aleatoria y con alta frecuencia con lo cual comienzan a mezclar las líneas de corriente provocando un movimiento caótico y entonces la viscosidad comienza a perder efecto. De igual forma que los dos últimos tipos de flujo existe otro el cual corresponde al periodo transitorio entre el flujo laminar y el turbulento y viceversa, a dicho flujo se le nombra como flujo de transición para el cual no existe

una teoría aplicable dado que se tendrán partes en donde se tiene un flujo ordenado y al mismo tiempo se tendrán zonas caóticas pero con menos energía que las del flujo turbulento.

#### Capa límite

En los flujos externos se tiene una zona donde el flujo se encuentra en contacto con la pared del sólido y lo rodea, en dicha región se deben de considerar los efectos viscosos, por otra parte si el flujo se encuentra alejado de la placa se puede hacer un análisis despreciando dichos efectos.

Los efectos viscosos que se presentan en las interacciones entre flujos y objetos se deben principalmente a que tenemos una condición que siempre se debe de cumplir, conocida como condición de no deslizamiento, ésta quiere decir que el fluido que se encuentra en contacto con alguna superficie del sólido deberá adquirir la velocidad de ésta última.

Para los efectos viscosos existe una técnica de análisis muy importante llamada teoría de capa límite que consiste en una zona en la que se puede considerar como la unión del comportamiento viscoso y el no viscoso en un flujo. El espesor de la capa límite ( $\delta$ ) es muy delgado, se considera como un lugar geométrico en donde la velocidad paralela a la placa  $u$  alcanza hasta un 99% de la velocidad del flujo alejando de la placa  $U$ .

Mientras se tenga una mayor velocidad del fluido y con esto un aumento en el número de Reynolds se tendrá un espesor menor como se muestra en la siguiente imagen:

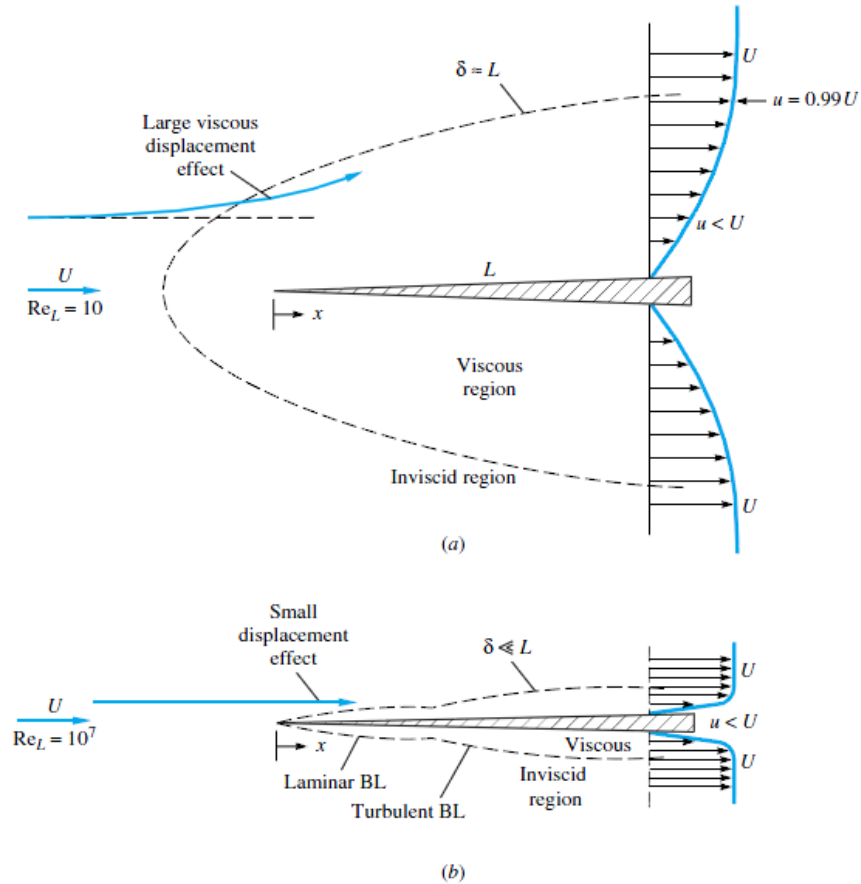


Fig. 2.1.2.1 Comparación de un flujo pasando alrededor de una placa puntiaguda: (a) flujo laminar, número de Reynolds pequeño, (b) número de Reynolds grande [13].

Las ecuaciones utilizadas para el cálculo del espesor de la capa límite según el tipo de flujo son:

$$\frac{\delta}{x} = \frac{5}{\sqrt{Re_x}} \quad \text{Para flujo laminar} \quad (2.1.2.3)$$

$$\frac{\delta}{x} = \frac{0.16}{\sqrt[4]{Re_x}} \quad \text{Para flujo turbulento} \quad (2.1.2.4)$$

#### Fuerzas aerodinámicas

La teoría de la capa límite nos ayuda a entender el comportamiento dinámico de un fluido viscoso cuando se tiene un cuerpo sólido u otro fluido interactuando con él. En esta interacción el fluido ejerce sobre los cuerpos distintas fuerzas y momentos que se presentan en las tres dimensiones, a cada componente sobre el eje coordenado se le nombra de una manera distinta, es decir, a la fuerza que se opone al movimiento y que es paralela al flujo se le llama arrastre y se denota con la letra  $D$  (por su nombre

en inglés, Drag), a la fuerza que se encuentra normal al flujo y a la superficie analizada se le conoce como sustentación y se denota con una letra L (por su nombre en inglés, Lift).

#### Teorema de Betz

Actualmente este teorema es aplicado en los cálculos para las turbinas, se usa principalmente para conocer la energía cinética del viento que captura el rotor de la turbina y la convierte en energía rotacional, esto quiere decir que mientras más energía se extraiga del viento su velocidad de salida después del rotor será mucho menor que la de entrada al mismo, (por lo cual usaremos la teoría aplicada a turbinas y después se extrapolara a las geometrías que ocuparemos).

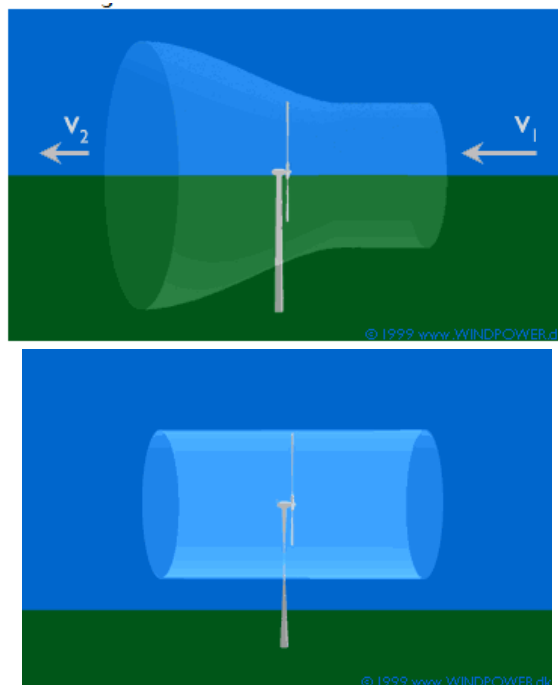


Fig. 2.1.2.2 Consideraciones del flujo antes y después del dispositivo estudiado para el Teorema de Betz [23].

El flujo se toma con la forma de botella y no con geometría cilíndrica por que se tendría una contradicción con la última, dado que se sabe que la velocidad en la entrada es mayor que la de la salida, así mismo se sabe que el flujo volumétrico que entra debe ser igual al que sale. Entonces podemos deducir que el flujo que entra y se topa con el rotor tiene que desviarse con lo cual deberá aumentar el área transversal y así poder cumplir dicha condición.

Se supone que si intentáramos extraer toda la energía cinética del viento, no habría flujo después del rotor pues el aire no podría abandonar la turbina con lo cual se produciría un estancamiento y no se extraería energía, por otro lado si se supone que

el viento pasa sin ninguna resistencia por parte del rotor entonces tampoco se extraería energía.

Por lo cual se debe conocer la proporción de frenado del viento óptima, para que no caiga en ninguno de los casos anteriores y pueda hacer más eficiente la conversión de energía eólica a mecánica. Actualmente se ha llegado a que una turbina ideal puede llegar a disminuir la velocidad del viento a 2/3 de su velocidad inicial, esto se debe a la ley física conocida como ley de Betz.

La ecuación de Betz es análoga a la eficiencia del ciclo de Carnot en la termodinámica, la cual nos dice que un motor térmico no puede extraer toda la energía que suministra la fuente, debido a la energía que se transmite al ambiente. La eficiencia del ciclo de Carnot se expresa por medio de la temperatura de entrada  $T_1$  y la de  $T_2$  que es la que se libera al ambiente.

$$\eta_{\text{Carnot}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad (2.1.2.5)$$

Mientras que en la ecuación de Betz usa la velocidad del viento antes de la turbina  $V_1$  y la velocidad que lleva después de la turbina  $V_2$  ya que los alabes frenan el viento y lo hacen pasar de  $V_1$  a  $V_2$ , además de las pérdidas debidas a la viscosidad, al arrastre que se produce en el rotor y al remolino producido por el rotor. Por los factores antes mencionados se tiene que:

$$V_1 > V_2 \quad (2.1.2.6)$$

Como ya se había mencionado si tenemos una disminución de velocidad tendremos un aumento en el área de sección transversal:

$$A_1 < A_2 \quad (2.1.2.7)$$

Si el aire es considerado como flujo incompresible, entonces la ecuación de conservación de masa o de continuidad puede ser escrita como:

$$\dot{m} = \rho A_1 V_1 = \rho A V = \rho A_2 V_2 = \text{constante} \quad (2.1.2.8)$$

Esto expresa el hecho que el flujo másico ( $\dot{m}$ ) se mantiene constante a lo largo del paso del viento por la turbina.

Aplicando el teorema de Bernoulli primero desde  $V_1$  a  $V$  y posteriormente de  $V$  a  $V_2$ , se obtiene la siguiente relación para la caída de presiones:

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho (V_1^2 - V^2) \quad (2.1.2.9)$$

Donde  $V$  es la velocidad promedio, considerando las velocidades anteriores y posteriores al dispositivo estudiado. Esta  $V$  es también la velocidad del viento en el momento en el que pasa por la zona donde se encuentran los álabes de una turbina. Considerando lo anterior, el empuje puede expresarse como:

$$T = \Delta p A \quad (2.1.2.10)$$

Partiendo de la ecuación de conservación de momento en una dimensión tenemos:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{cv} \rho V(x, y, z) dx dy dz + \iint_{cs} V(x, y, z) \rho \mathbf{V} \cdot d\mathbf{A} = F_{ext} + F_{pres} \quad (2.1.2.11)$$

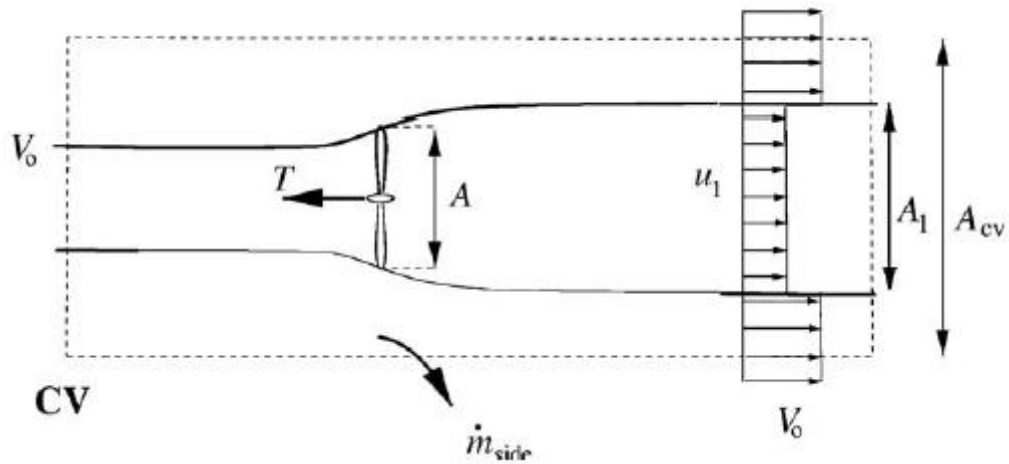


Fig. 2.1.2.3 Volumen de control circular alrededor de una turbina eólica. [7]

El primer término de la ecuación 2.1.2.11 se vuelve cero ya que se considera un flujo estacionario. El último término también es cero porque la presión en el extremo final tiene el mismo valor al atmosférico y actúa en un área igual a la inicial. Además en los límites laterales del volumen de control considerado la fuerza de presión no tiene componente axial.

Utilizando entonces las consideraciones simplificadas de un rotor ideal, la ecuación anterior (2.1.2.11) puede quedar como:

$$\rho V_2^2 A_1 + \rho V_1^2 (A_{cv} - A_1) + \dot{m}_{lateral} V_1 - \rho V_1^2 A_{cv} = -T \quad (2.1.2.12)$$

El flujo másico que sale del extremo y denominado  $\dot{m}_{lateral}$  puede obtenerse a través de la ecuación de conservación de la masa.

$$\rho A_1 V_2 + \rho (A_{cv} - A_1) V_1 + \dot{m}_{lateral} = \rho A_{cv} V_1 \quad (2.1.2.13)$$

De tal forma que queda definido por:



$$\dot{m}_{lateral} = \rho A_1 (V_1 - V_2) \quad (2.1.2.14)$$

A través de la ecuación de conservación de la masa, la expresión del flujo másico lateral y la ecuación de conservación de momento simplificada (2.1.2.12), se puede expresar al empuje como:

$$T = \rho VA(V_1 - V_2) = \dot{m}_{lateral}(V_1 - V_2) \quad (2.1.2.15)$$

Si el empuje se reemplaza por su expresión en términos de la pérdida de presión en el rotor se obtiene la siguiente relación:

$$V = \frac{1}{2}(V_1 + V_2) \quad (2.1.2.16)$$

Considerando el volumen de control siguiente:

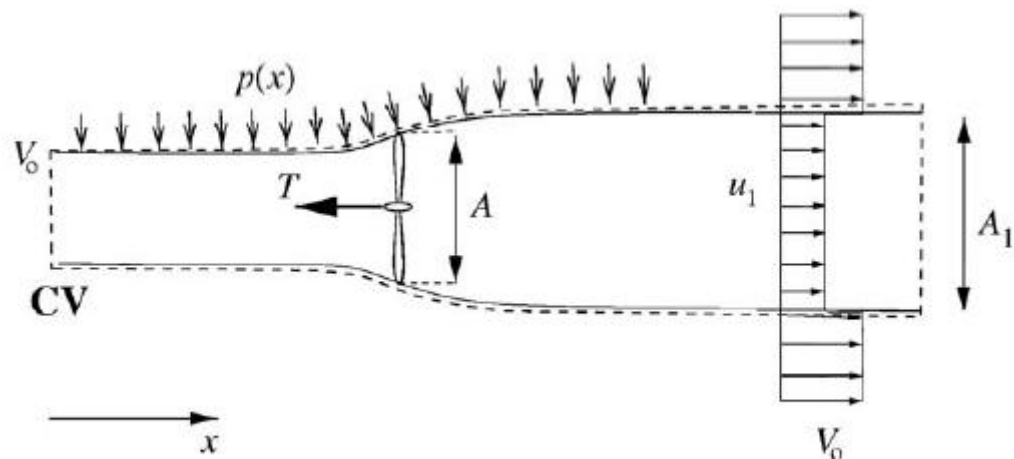


Fig. 2.1.2.4 Volumen de control alternativo alrededor de una turbina eólica. [7]

Al no haber flujo másico lateral en este volumen de control, ya que se alinea con las líneas de corriente, y al presentarse una distribución de presiones en las paredes laterales, la ecuación de momento axial queda:

$$T = \rho VA(V_1 - V_2) + F_{pres} \quad (2.1.2.17)$$

Comparando las expresiones obtenidas para el empuje en ambos flujos de control, se puede observar que las fuerzas de presión netas siguientes a las líneas de corriente son iguales a cero. Y al considerarse un flujo sin fricción no hay un cambio en su energía interna desde la entrada hasta la salida, por lo que su potencia puede

derivarse de la ecuación de la energía aplicada para el segundo volumen de control, mostrado anteriormente en la Fig. 2.1.2.4:

$$P = \dot{m} \left( \frac{1}{2} V_1^2 + \frac{P_0}{\rho} - \frac{1}{2} V_2^2 - \frac{P_0}{\rho} \right) \quad (2.1.2.18)$$

Y sustituyendo la expresión de flujo másico en términos de densidad, área y volumen se tiene entonces:

$$P = \frac{1}{2} \rho V A (V_1^2 - V_2^2) \quad (2.1.2.19)$$

Expresando la potencia y el empuje en términos de  $V_1$  y  $V_2$  tenemos:

$$\begin{aligned} T &= \rho A \frac{1}{2} (V_1 + V_2) \cdot (V_1 - V_2) \\ &= \frac{1}{2} \rho A (V_1^2 - V_2^2) \end{aligned} \quad (2.1.2.20)$$

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{2} \rho A V \cdot (V_1^2 - V_2^2) \\ &= \frac{1}{4} \rho A (V_1 + V_2) (V_1 + V_2) \cdot (V_1 - V_2) \\ &= \frac{1}{4} \rho A (V_1 + V_2) (V_1^2 - V_2^2) \end{aligned} \quad (2.1.2.21)$$

Podemos introducir un factor conocido como factor de interferencia,  $b$  que es la relación entre la velocidad  $V_1$  y la  $V_2$ :

$$b = \frac{V_2}{V_1} \quad (2.1.2.22)$$

Con la expresión anterior volvemos a expresar (F) y (P) pero ahora en términos de (b) de la siguiente manera:

$$F = \frac{1}{2} \rho A V_1^2 (1 - b^2) \quad (2.1.2.23)$$

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{4} \rho A (V_1 + V_2) (V_1^2 - V_2^2) \\ &= \frac{1}{4} \rho A V_1^3 (1 - b^2) (1 + b) \end{aligned} \quad (2.1.2.24)$$

Lo más importante que podemos observar en este análisis de extracción de energía del aire es que la potencia de ésta es proporcional al cubo de la velocidad de entrada al rotor ( $V_1$ ) y depende del factor de interferencia  $b$ .

La energía cinética contenida en el flujo de entrada al rotor cuando  $V = V_1$  y a través de área de sección transversal (A) se expresa de la siguiente manera:

$$W = \frac{1}{2} \rho A V_1^3, \left[ \frac{\text{Joules}}{\text{m}^2 \text{s}} \text{m}^2 \right], [\text{Watts}] \quad (2.1.2.25)$$

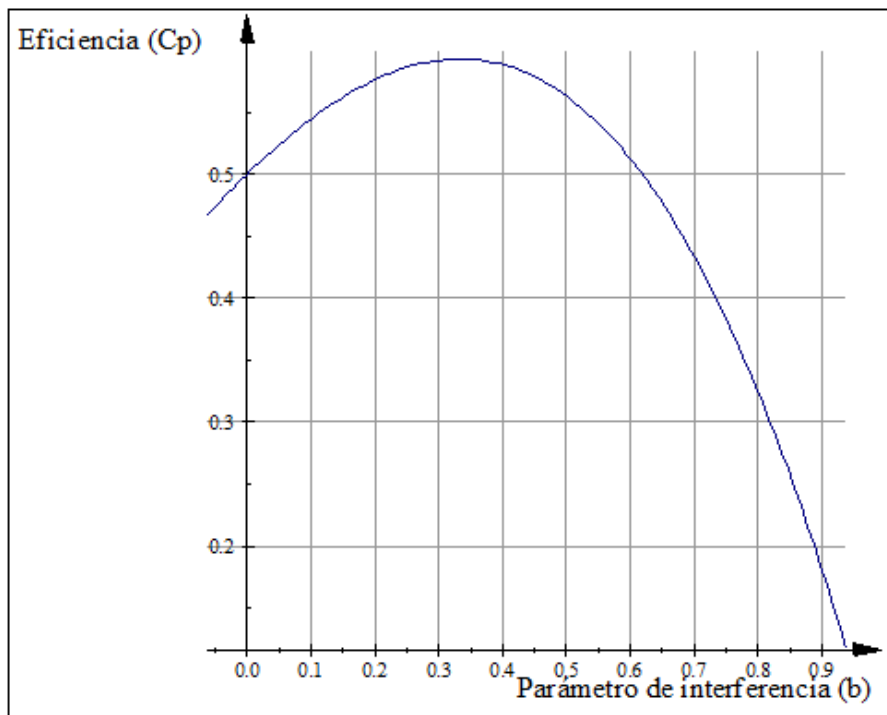
El coeficiente de rendimiento o coeficiente de potencia ( $C_p$ ) es la relación adimensional entre la potencia extraíble (P) y la energía cinética que lleva la corriente de aire antes de los alabes (W) y como su nombre lo dice dicha relación mide la eficiencia de una turbina extrayendo energía de la corriente del viento y se expresa de la siguiente forma:

$$C_p = \frac{P}{W} \quad (2.1.2.26)$$

$$= \frac{\frac{1}{4} \rho A V_1^3 (1 - b^2)(1 + b)}{\frac{1}{2} \rho A V_1^3}$$

$$C_p = \frac{1}{2} (1 - b^2)(1 + b) \quad (2.1.2.27)$$

Graficando la ecuación anterior obtenemos:



|       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| b     | 0.0   | 0.1   | 0.2   | 0.3   | 1/3   | 0.4   | 0.5   | 0.6   | 0.8   | 0.9   | 1     |
| $C_p$ | 0.500 | 0.545 | 0.576 | 0.592 | 0.593 | 0.588 | 0.563 | 0.512 | 0.324 | 0.181 | 0.000 |

Fig. 2.1.2.5 Gráfica del coeficiente de rendimiento o potencia ( $C_p$ ) contra el parámetro de interferencia (b) [8].

De la figura 2.1.2.3 podemos corroborar que cuando  $b = 1$ ,  $V_1 = V_2$  con lo cual la energía se conservará y así no habrá transferencia de la misma hacia los alabes y  $C_p=0$ , por otro lado si  $b=0$ ,  $V_1=0$  y se detiene el flujo alcanzando un nivel de  $C_p= 0.5$ . Se puede observar que el máximo valor de  $C_p$  se tendrá en un valor de  $b=1/3$ .

Para poder conocer la condición en la cual se tendrá la mayor eficiencia, se deriva la ecuación (2.1.2.24) con respecto al factor de interferencia ( $b$ ), aplicando la fórmula para la derivada de un producto se desarrolla para obtener el valor máximo de eficiencia:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx}(uv) &= u \frac{dv}{dx} + v \frac{du}{dx} \\ \frac{d}{db}(C_p) &= \frac{1}{2} \frac{d}{db} [(1 - b^2)(1 + b)] \\ &= \frac{1}{2} \frac{d}{db} [(1 - b^2)(1 + b)] \\ &= \frac{1}{2} [(1 - b^2) - 2b(1 + b)] \\ &= \frac{1}{2} [1 - b^2 - 2b - 2b^2] \\ &= \frac{1}{2} [1 - 3b^2 - 2b] \end{aligned} \tag{2.1.2.28}$$

La ecuación anterior tiene dos soluciones, la trivial es la que implica que:

$$\begin{aligned} 1 + b &= 0 \\ b = \frac{V_2}{V_1} &= -1 \rightarrow V_2 = -V_1 \end{aligned} \tag{2.1.2.29}$$

Lo cual es una incongruencia ya que es físicamente imposible que pase eso.

La otra solución es la que si es físicamente posible:

$$\begin{aligned} 1 - 3b &= 0 \\ b = \frac{V_2}{V_1} &= \frac{1}{3}, \rightarrow V_2 = \frac{1}{3}V_1 \end{aligned} \tag{2.1.2.30}$$

Este valor que garantiza el funcionamiento óptimo del arreglo se sustituye en la ecuación (2.1.2.24) para conocer la eficiencia máxima:

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{2} \left( 1 - \left( \frac{1}{3} \right)^2 \right) \left( 1 + \frac{1}{3} \right) \\ &= \frac{16}{27} = 0.59259 \end{aligned}$$

$$= 59.26 \%$$

Por lo cual la ley de Betz dice que sólo puede convertirse menos de 16/27 (el 59.26 %) de la energía cinética en energía mecánica usando un aerogenerador.

### 2.1.3. Electromagnetismo

La causa esencial del magnetismo es el movimiento de cargas eléctricas, por lo que forma parte de un fenómeno más general y complejo llamado electromagnetismo.

Existen fuerzas entre conductores cuando circulan corrientes eléctricas a través de ellos, a estas se les conoce como campo magnético, sin embargo también sucede lo recíproco, es decir que un campo magnético puede producir corrientes eléctricas. Este fenómeno se conoce como inducción electromagnética y se explica mediante la ley de la inducción electromagnética de Faraday, formulada por Michael Faraday en 1831. Esta ley consiste en que a partir de campos magnéticos variables con respecto al tiempo, se pueden producir campos eléctricos y por lo tanto corrientes eléctricas.

Para conseguir estas corrientes eléctricas y como consecuencia una diferencia de voltaje, que es conocida como fuerza electromotriz inducida, se realiza un movimiento relativo entre un imán y un material conductor. Dependiendo del movimiento relativo que se lleve a cabo será la magnitud y la polaridad de esta fuerza. No es estrictamente necesario que se emplee un magneto para inducir esta fuerza, si se emplea un circuito con una corriente eléctrica circulante y se desplaza el material conductor hacia este circuito, también se tendrá una fuerza electromotriz entre las terminales de este material. Lo que sí es necesario para obtener esta fuerza es la existencia de un movimiento relativo entre el dispositivo productor del campo y el conductor, o la variación de la corriente del circuito que se encuentra cercano al conductor, puesto que es la variación del flujo concatenado o enlazado por el conductor respecto al tiempo, lo que provoca la presencia de esta fuerza.

Las fuerzas electromotrices se presentarán con los cambios de flujo enlazado por el conductor [9], ya sean estos cambios consecuencias de que se acerque y aleje el magneto o porque se abra y cierre un circuito, o porque en éste se encuentre una corriente alterna, lo que provoca que la acción del flujo magnético producido por el circuito aumente o disminuya, sucediendo entonces lo mismo con el flujo concatenado por el conductor.

Todo lo anterior se puede resumir en la ecuación de la ley de Faraday, en la cual se expresa matemáticamente la relación entre la rapidez de cambio del flujo concatenado, denominado con  $\lambda$ , y la fuerza electromotriz inducida:

$$\varepsilon_i = - \frac{d\lambda}{dt} \quad (2.1.3.1)$$

Donde el signo que se incluye muestra que la polaridad de la fuerza electromotriz inducida es opuesta a la variación del flujo que esté concatenado por el conductor.

Esta ley se suele utilizar para embobinados de N espiras de material conductor, por lo que se aproxima el cálculo del flujo concatenado como el producto de N por el flujo magnético que cruza a través de una sola de las espiras. Por lo que haciendo la consideración de que este flujo es igual en todas ellas, la expresión de la ley de Faraday que emplearemos será:

$$\varepsilon_i = -N \frac{d\Phi_b}{dt} \quad (2.1.3.2)$$

La ley de Faraday no permite conocer la dirección para la cual el flujo y la corriente que produce el fenómeno electromagnético de inducción son positivos, por lo que es necesario utilizar el principio de Lenz, enunciado por Heinrich Friedrich Lenz en 1834. Básicamente lo que enunció Lenz fue que el sentido que tendrá la corriente inducida será tal que se opondrá a la causa que lo produce. Esto se puede explicar considerando el principio de conservación de la energía, pues si el sentido de la corriente inducida fuera el mismo que el de la causa que lo produce, entonces el imán o dispositivo productor del campo sería atraído por el conductor, lo que significaría que esta fuerza inducida sería capaz de desplazar al productor del campo y desarrollar un trabajo. Como el conductor posee una cierta resistencia, habría una disipación de energía en forma de calor en éste. Es decir que se obtendría trabajo sobre el productor del campo y energía calorífica en el conductor, sin invertir más que un impulso inicial para provocar un movimiento relativo entre ambos.

Sin embargo si el sentido de la corriente inducida es opuesto al del flujo del campo que la produce, entonces existirá una repulsión, pues actuarán ambos dispositivos, el productor y el conductor, como polos magnéticos del mismo tipo y entonces se necesitará de una fuerza externa que permita mantener el movimiento del productor del campo. En condiciones de ausencia de efectos disipativos, la energía calorífica disipada por el conductor será igual al trabajo realizado sobre el productor del campo. A partir de la ley de Faraday y del principio de Lenz se puede entender el principio de operación de la mayor parte de los generadores eléctricos que se emplean en la actualidad. De forma simple se puede decir que consisten en una bobina de N vueltas que gira dentro de un campo magnético que permanece uniforme, pero debido a las variaciones de flujo magnético concatenado por las espiras, en las terminales de este embobinado se presenta una fuerza electromotriz inducida que se conecta a un circuito externo y posteriormente es acondicionada para su uso. Este mismo principio de movimiento relativo entre un imán y una bobina se puede emplear para obtener otras maneras de generar electricidad alterna.

#### 2.1.4. Piezolectricidad

Los materiales electrostáticos presentan un comportamiento electromecánico, esto quiere decir que experimentan deformaciones mecánicas cuando se colocan dentro

de un campo eléctrico, pero también se polarizan eléctricamente cuando se les aplican cargas mecánicas. La piezoelectricidad se refiere únicamente a la relación lineal electromecánica de estos materiales electrostáticos. Los piezoelectricos son ciertas clases de materiales cristalinos cuya estructura reacciona ante las cargas mecánicas y los campos eléctricos de la manera antes mencionada, es decir, prácticamente lineal. Generalmente se emplean como transductores electromecánicos.

Esta propiedad se encuentra de forma natural en ciertos materiales cristalinos, pero también puede ser inducida en otro tipo de materiales policristalinos.

Puesto que el comportamiento de estos materiales electrostáticos en general y del fenómeno de la electroelasticidad, en la que se fundamenta la piezoelectricidad, no siempre es completamente lineal [14], se ha desarrollado una teoría en la que se ha linealizado la electroelasticidad de estos materiales, de forma que al considerar el caso de deformaciones y campos infinitesimales, se puede simplificar su estudio y a la vez se puede explicar la relación lineal existente cuando se presenta la piezoelectricidad, ésta se conoce como la teoría lineal de la piezoelectricidad [14].

Esta teoría consiste en reducir las ecuaciones que explican el comportamiento electrostático no lineal, pero para deformaciones y campos infinitesimales, considerando pequeñas amplitudes en el movimiento del cuerpo electrostático en relación con su estado de referencia, debido a pequeñas cargas mecánicas o eléctricas.

Las leyes físicas fundamentales que rigen el comportamiento del movimiento de un material dieléctrico son principalmente experimentales y forman la base de una teoría de medio continuo, la cual sirve para explicar y desarrollar la teoría de la piezoelectricidad. Sin embargo aquí solamente se presentarán de forma sencilla para facilitar su entendimiento y el del resto del trabajo.

### Polarización

Se presenta cuando un dieléctrico es ubicado dentro de un campo eléctrico, de forma que las cargas eléctricas de sus moléculas se ven afectadas por éste y se redistribuyen a nivel microscópico. Esto da como resultado una polarización a nivel macroscópico, es decir que un entre los extremos del dieléctrico se presentará una diferencia de potencial. La redistribución puede ocurrir de diversas maneras: electrónica, iónica u orientacional, sin que se tenga una diferencia a nivel macroscópico. Para describir el estado de polarización macroscópica de un material se emplea un vector por unidad de volumen expresado como:

$$P = \lim_{\Delta v \rightarrow 0} \frac{\sum_{\Delta v} P_{\text{Micro}}}{\Delta v} \quad (2.1.4.1)$$

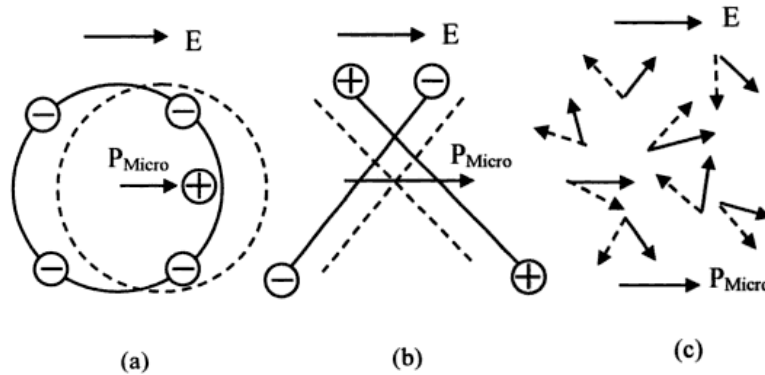


Fig. 2.1.4.1. Polarización microscópica: (a) electrónica, (b) iónica, (c) orientacional [14].

### Efecto Piezoeléctrico

En algunos materiales la polarización también puede ser inducida por cargas mecánicas, a este fenómeno es al que se le conoce como efecto piezoeléctrico. La polarización inducida se puede encontrar en diferentes zonas del material, incluso en ángulo con respecto a la carga aplicada, esto debido a la anisotropía de dicho material. Si la carga mecánica es invertida, ocurrirá lo mismo con la polarización que se induzca. En el caso contrario, cuando se aplica un voltaje al material con propiedades piezoeléctricas, éste se deformará, presentándose el fenómeno que se conoce como efecto piezoeléctrico converso.

Esta propiedad dependerá de la forma en que se distribuya microscópicamente la carga.

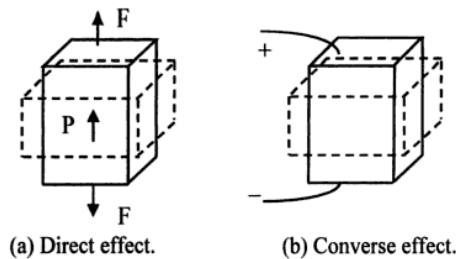


Fig. 2.1.4.2. Efecto piezoeléctrico, efecto directo y efecto converso [14].

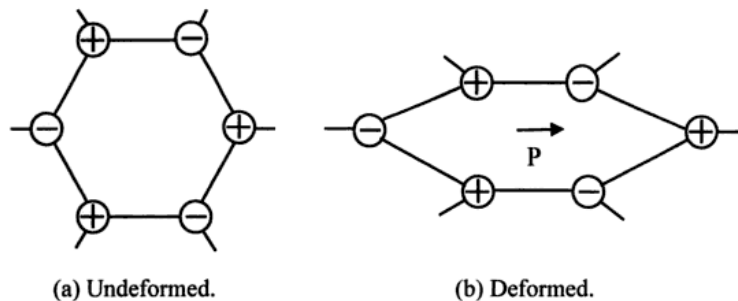


Fig. 2.1.4.3. Microestructura de un piezoeléctrico. Origen del efecto piezoeléctrico directo [14].



Fuerza eléctrica de cuerpo, par y potencia

Cuando un material que puede ser deformado mecánicamente y eléctricamente polarizable se somete a un campo eléctrico, un elemento diferencial de este experimenta fuerza de cuerpo y un par debido a dicho campo. La fuerza de cuerpo se refiere a una fuerza que actúa a lo largo de todo el volumen de un cuerpo, en este caso del elemento diferencial. Cuando el material se deforma o polariza, entonces el campo eléctrico realiza trabajo sobre el material.

Estas características son importantes para comprender la electroelasticidad de un material y poder obtener sus ecuaciones. Esto se realiza mediante diferentes métodos, mediante el promedio de los campos eléctricos asociados con la interacción de las partículas cargadas o mediante los grados de libertad de estas partículas.

Para poder describir los efectos de la fuerza eléctrica de cuerpo, el par y la potencia de forma macroscópica se emplea un modelo de medios continuos que interactúan entre sí. Uno de los medios involucra la masa y las cargas positivas, mientras que el otro, denominado electrónico, tiene carga negativa y no tiene masa.

La polarización eléctrica se modela como un desplazamiento relativo del medio continuo electrónico con respecto del otro medio continuo. Haciendo esto y aplicando las leyes básicas de la física a cada medio, se obtiene que:

$$F_j^E = \rho_e E_j + \rho_i E_{j,i} \quad (2.1.4.2)$$

$$C_i^E = \epsilon_{ijk} P_j E_k \quad (2.1.4.3)$$

$$w^E = \rho E_i \pi_i \quad (2.1.4.4)$$

Donde  $E$  es el vector del campo eléctrico,  $\rho$  es la densidad de la masa,  $\rho_e$  es la densidad de la carga libre y  $\pi_i = \rho_i/\rho$  es la polarización por unidad de masa.

En este estudio del fenómeno de la piezoelectricidad se considera al campo eléctrico como estático, por lo que forman una aproximación cuasi estática que es válida si se considera el fenómeno de la piezoelectricidad con longitudes de ondas elásticas, que son mucho más cortas que las longitudes de ondas electromagnéticas a la misma frecuencia.

Esta es la forma más sencilla de aproximar la teoría electrodinámica explicándola a través de una perturbación, es decir, explicándola mediante un factor externo que provoque la presencia del efecto piezoeléctrico. Esta perturbación puede ser un campo eléctrico o una deformación mecánica.

PZT

En este trabajo se empleará un piezoeléctrico formado por PZT, que es una solución sólida de Titanato de Plomo ( $PbTiO_3$ ) y Zirconato de Plomo ( $PbZrO_3$ ), modificados mediante algunos aditivos, que permiten obtener piezoeléctricos con prácticamente cualquier tamaño y forma [31]. Las propiedades piezoeléctricas del PZT son muy altas, aunado a que son resistentes, duros, químicamente inertes y su funcionamiento no se ve afectado cuando se encuentran en ambientes húmedos.

Un cerámico de tipo PZT puede considerarse como una serie de estructuras cristalinas aleatoriamente orientadas, por lo que en caso de que se sinterice para su formación, el material se volverá isotrópico y no presentará el efecto piezoeléctrico debido a esta orientación aleatoria de su estructura microscópica.

Asimismo debido a esta característica de alineación aleatoria, los cerámicos hechos de PZT pueden hacerse piezoeléctricos en una determinada dirección únicamente a través de someterlos a un campo eléctrico intenso. Cuando este campo sea removido, los dipolos permanecerán alineados dándole al material una polarización remanente y una ligera deformación permanente. Este proceso de polarización es el último que se realiza durante la manufactura de los componentes de PZT.

La forma en que estos materiales se emplean para la obtención de una diferencia de potencial entre sus caras o extremos, consiste en colocar un par de electrodos en las superficies que sean perpendiculares al eje de polarización de forma que cuando se aplica un voltaje, el cuerpo se deformará a lo largo del eje de polarización. O si se realiza una deformación a lo largo de dicho eje, se obtendrá una diferencia de potencial entre las caras en donde se ubican los electrodos.

Las propiedades de los materiales piezoeléctricos cambian gradualmente con el paso del tiempo, estos cambios tienden a ser logarítmicos. El efecto del paso del tiempo cambiará dependiendo de la propiedad que sea de interés, es decir que algunas características del material pueden sufrir alteraciones más significativas que otras, asimismo esto dependerá de la composición química del cerámico, de su geometría, del proceso de manufactura realizado y del uso que se le dé al piezoeléctrico.

Los efectos que más impacto tienen en el envejecimiento del material son: esfuerzos mecánicos elevados, un campo eléctrico contrario a la polarización del material o temperaturas de funcionamiento cercanas a la temperatura del punto de Curie.

En lo referente a la temperatura de operación los piezoeléctricos también tienen una serie de limitaciones que pueden llegar a reducir el rendimiento. Sin embargo mientras no se alcance la temperatura de Curie, la depolarización permanente del material no ocurrirá. Para evitar este efecto térmico, se recomienda que la temperatura máxima de funcionamiento del material sea de un valor cercano a la mitad de la temperatura del punto de Curie. Este punto se refiere a la temperatura crítica a la que la estructura cristalina de los cerámicos piezoeléctricos pierden su polarización y por consiguiente su propiedad piezoeléctrica.

Un campo eléctrico intenso con una polaridad contraria a la de la polarización original del material puede provocar la depolarización del cerámico. Campos eléctricos alternos pueden llegar a tener el mismo efecto en la mitad del ciclo que sea opuesta a la dirección de la polarización original.

Finalmente los esfuerzos mecánicos también pueden llegar a depolarizar un material piezoeléctrico. El límite máximo del esfuerzo depende del material y de la duración que tendrá la aplicación de dicho esfuerzo.

### Arreglos Bimorph

En este trabajo se utilizarán arreglos de piezoeléctricos denominados “bimorph”, debido a que para esta aplicación en específico se requiere de un mayor desplazamiento del que se puede conseguir con un material cerámico PZT únicamente. Esta estructura consiste en un arreglo bilaminar que está diseñado para colocarse en forma de cantiléver. La estructura consiste en dos tiras delgadas de material PZT que se colocan juntas con un material entre ambas que sirve para unir las y para darle a la estructura una mayor flexibilidad. Aunado a esto, los bimorphs trabajan generalmente en el modo  $d_{31}$ , lo que explica su mayor flexibilidad en comparación con un dispositivo PZT convencional. El modo  $d_{31}$  hace referencia a la constante piezoeléctrica del material ( $d$ ), cuando los electrodos están colocados perpendiculares al eje de polarización (3), indicando también, que el esfuerzo aplicado o la deformación inducida están en la dirección del eje perpendicular (1) al eje de polarización. Ver Fig. 2.1.4.4, en la que se muestran las propiedades generales de los materiales piezoeléctricos.

Los arreglos de tipo bimorph que utilizamos en este trabajo están formados por placas de material cerámico de la serie PZT 5A, de la empresa Morgan Technical Ceramics [31]. Este material se emplea generalmente como un generador o receptor en hidrófonos, acelerómetros y sensores de vibración. Está formado por Titanato de Plomo y Zirconato de Plomo en proporciones diferentes, lo que le otorga características de ambos, teniendo una alta sensibilidad, permisividad y una gran estabilidad a lo largo del tiempo, lo que facilita su aplicación en los mecanismos que se estudian.

### Propiedades de los materiales cerámicos piezoeléctricos

Las propiedades piezoeléctricas de un material se describen mediante un sistema de letras que en algunos casos incluyen subíndices para indicar ciertas características. Las más utilizadas e importantes para comprender su funcionamiento y poder diferenciar un tipo de material de otro, son las siguientes:

#### Coeficiente de acoplamiento electromecánico

Es una propiedad adimensional que se designa con la letra  $k$  minúscula, se define de dos maneras dependiendo de si al material se le aplica una carga mecánica o se le somete a un campo eléctrico:

$$k = \sqrt{\frac{\text{energía mecánica almacenada}}{\text{energía eléctrica suministrada}}} \quad (2.1.4.11)$$

o de forma contraria:

$$k = \sqrt{\frac{\text{energía eléctrica almacenada}}{\text{energía mecánica suministrada}}} \quad (2.1.4.12)$$

#### Constante piezoeléctrica

Cada material piezoeléctrico tiene su propia constante, a la cual se le asignó la letra  $d$  minúscula, la cual se puede calcular como:

$$d = \frac{\text{Tensión generada}}{\text{Esfuerzo aplicado}} \text{ medida en: } \left[ \frac{\text{m}}{\text{V}} \right] \quad (2.1.4.13)$$

en caso contrario se calcula como:

$$d = \frac{\text{Cambio de densidad en circuito corto}}{\text{Esfuerzo aplicado}} \text{ medida en: } \left[ \frac{\text{C}}{\text{N}} \right] \quad (2.1.4.14)$$

#### Constante piezoeléctrica de voltaje

A esta propiedad se le asigna la letra  $g$ , y se define como:

$$g = \frac{\text{Campo eléctrico de circuito abierto}}{\text{Esfuerzo aplicado}} \text{ medida en: } \left[ \frac{\text{V}}{\text{N}} \right] \quad (2.1.4.15)$$

o de forma contraria:

$$g = \frac{\text{Deformación generada}}{\text{Densidad de la carga aplicada}} \text{ medida en: } \left[ \frac{\text{M}}{\text{C}} \right] \quad (2.1.4.16)$$

#### Constante dieléctrica relativa

Esta constante es la misma que se emplea en los dispositivos capacitivos, se expresa con la letra  $K$  en mayúsculas y se calcula con relación a la permisividad del material con relación a la del medio donde se encuentra:

$$K = \frac{\text{Permisividad del material}}{\text{Permisividad del espacio de trabajo}} \quad (2.1.4.17)$$

#### Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad de los materiales piezoeléctricos se calcula como el de cualquier otro material, relaciona la tensión con la deformación. Se designa con la letra  $Y$  mayúscula y se obtiene con:

$$Y = \frac{\text{Esfuerzo}}{\text{Deformación}} \text{ medido en: } \left[ \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right] \quad (2.1.4.18)$$

#### Densidad

Es otra de las propiedades que no son exclusivas de los materiales piezoeléctricos, se designa con la letra griega  $\rho$ . Determina la cantidad de masa en un volumen determinado. Se calcula como:

$$\rho = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}} \text{ y se mide con: } \left[ \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right] \quad (2.1.4.19)$$

#### Constante de frecuencia

Se designa con la letra N mayúscula y permite conocer la frecuencia a la cual el material piezoeléctrico trabajará de forma más adecuada. Se obtiene con:

$$N = \text{Dimensión de control} \times \text{Frecuencia de resonancia} \quad (2.1.4.20)$$

Se mide en Hertz por metro [Hzm].

#### Sistema de notación de materiales piezoeléctricos

Para entender el comportamiento de un material cerámico piezoeléctrico se requiere conocer el significado de los subíndices que se emplean en algunas de las propiedades y que permiten seleccionar el material adecuado para la aplicación en cuestión.

Los subíndices hacen referencia a la dependencia que existe entre las direcciones en las que se aplica el esfuerzo o el campo eléctrico sobre el material. Debido a que los cerámicos de tipo piezoeléctrico son anisotrópicos y a que la dirección de la polarización puede ser elegida durante los procesos de producción, es necesario identificar los ejes del componente para poder especificar sus parámetros de funcionamiento. De esta forma cada uno de los ejes se determina con un número, refiriéndose al eje 3 como el eje de polarización, teniendo a los ejes 2 y 1 perpendiculares a este. Asimismo se emplean los números 4, 5 y 6 para designar la dirección en la que se aplican los esfuerzos mecánicos, estando estos números asociados con los ejes 1, 2 y 3 respectivamente [31].

A pesar de que estas características se encuentran expresadas en los caracteres de las propiedades, a través de subíndices y superíndices, permitiendo que sean identificadas las propiedades de los materiales solamente. También se pueden utilizar también para expresar las características físicas de los elementos realizados con estos materiales, lo que facilita la comprensión y aplicación de dispositivos hechos con cerámicos piezoeléctricos como los bimorphs empleados en la etapa experimental.

Cada una de las propiedades de estos materiales cuenta con superíndices y subíndices específicos que permiten comprender las características de cada material. Estas se muestran a continuación, en la Fig. 2.1.4.4.

|            |   |
|------------|---|
| $S_{11}^D$ | <ul style="list-style-type: none"> <li>• S: Conformidad = deformación / esfuerzo</li> <li>• D: indica que la conformidad está medida con el circuito abierto.</li> <li>• 11: indican que la tensión y el esfuerzo, respectivamente, están en la dirección del eje 1.</li> </ul>   |
| $S_{36}^E$ | <ul style="list-style-type: none"> <li>• S: Conformidad = deformación / esfuerzo</li> <li>• E: indica que la conformidad está medida con los electrodos cerrando el circuito.</li> <li>• 36: indican que la tensión está ocurriendo en la dirección del eje 3 y que el esfuerzo se está aplicando también alrededor del eje 3.</li> </ul> |
| $K_1^T$    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• K: Constante dieléctrica relativa.</li> <li>• T: indica que todos los esfuerzos sobre el material son constantes, es decir, no hay fuerzas externas.</li> <li>• 1: indica que los electrodos están colocados perpendiculares al eje 1.</li> </ul>  |
| $K_3^S$    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• K: Constante dieléctrica relativa</li> <li>• S: indica que todas las deformaciones en el material son constantes, es decir, que el material está bloqueado y no puede deformarse.</li> <li>• 3: indica que los electrodos están colocados perpendiculares al eje 3.</li> </ul>                   |
| $k_{15}$   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• k: Acople electromecánico.</li> <li>• 15: indican que los electrodos son perpendiculares al eje 1, y que el esfuerzo está aplicado alrededor del eje 2, respectivamente.</li> </ul>  |
| $k_p$      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• k: Acople electromecánico.</li> <li>• p: se utiliza solamente para discos delgados. Indica que los electrodos están colocados perpendiculares al eje 3 y que los esfuerzos son iguales en todas direcciones perpendiculares al eje 3.</li> </ul>   |
| $d_{33}$   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• d: Constante piezoeléctrica.</li> <li>• 33: indica que los electrodos están ubicados perpendiculares al eje 3, y que la deformación inducida o el esfuerzo aplicado están en la dirección del eje 3.</li> </ul>  |
| $d_h$      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• d: Constante piezoeléctrica.</li> <li>• h: indica que los esfuerzos están aplicados con la misma magnitud en los ejes 1, 2 y 3 (un esfuerzo hidrostático), además de que los electrodos están perpendiculares al eje 3.</li> </ul>   |
| $g_{31}$   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• g: campo eléctrico/esfuerzo aplicado o deformación/carga aplicada entre área de los electrodos</li> <li>• 31: indica que los electrodos están colocados perpendiculares al eje 3, e indica que el esfuerzo aplicado o la deformación inducida están en la dirección del eje 1.</li> </ul>        |
| $g_{15}$   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• g: campo eléctrico/esfuerzo aplicado o deformación/carga aplicada entre área de los electrodos</li> <li>• 15: indica que los electrodos están ubicados perpendiculares al eje 1, y que el esfuerzo o la deformación inducida se encuentran alrededor del eje 2.</li> </ul>                       |

Fig. 2.1.4.4. Propiedades de los materiales piezoeléctricos. [31]

Las expresiones anteriores nos permiten comprender y aproximar de forma adecuada la interacción entre el comportamiento eléctrico y el mecánico de los materiales cerámicos piezoeléctricos como el PZT. Para ello se emplean los parámetros antes mencionados con las siguientes ecuaciones que describen las relaciones de estos materiales:

$$S = s^E \cdot T + d \cdot E \quad (2.1.4.21)$$

$$D = d \cdot T + \epsilon^T \cdot E \quad (2.1.4.22)$$

$$E = -g \cdot T + \frac{D}{\epsilon^T} \quad (2.1.4.23)$$

$$S = s^D \cdot T + g \cdot D \quad (2.1.4.24)$$

$$d = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot g \quad (2.1.4.25)$$

En las que:

$$E = \text{campo eléctrico } \left[ \frac{V}{m} \right]$$

$$T = \text{esfuerzo } \left[ \frac{N}{m^2} \right]$$

$$S = \text{tensión [SI]}$$

$$D = \text{desplazamiento dieléctrico } \left[ \frac{C}{m^2} \right]$$

$$\epsilon_r = \text{permisividad relativa o constante dieléctrica}$$

$$\epsilon_0 = \text{permisividad del vacío } (8.85 \times 10^{-12} \left[ \frac{F}{m} \right])$$

$$\epsilon^T = \text{permisividad bajo un esfuerzo constante}$$

Los bimorphs que utilizaremos en la etapa experimental pueden considerarse como placas delgadas, por lo que las ecuaciones específicas que permiten conocer su comportamiento como consecuencia de sus características físicas son las siguientes, siempre y cuando se cumpla que el ancho es significativamente mayor que el espesor de la placa ( $W \gg thk$ ):

Frecuencia de resonancia:

$$f_r = \frac{N_l}{L \text{ o } W} \quad (2.1.4.26)$$

$$f_r = \frac{N_t}{thk} \quad (2.1.4.27)$$

En donde:

$$N = \text{constante de frecuencia}$$

$$f = \text{frecuencia de resonancia de la placa}$$

$$L = \text{largo de la placa}$$

$$W = \text{ancho de la placa}$$

$$thk = \text{espesor de la placa}$$

Capacitancia:

$$C = \frac{K_{33}^T \cdot \epsilon_0 \cdot \pi \cdot L \cdot W}{thk} \quad (2.1.4.28)$$

En donde:

- K = constante dieléctrica relativa  
 $\epsilon_0$  = permisividad del vacío ( $8.85 \times 10^{-12} \left[ \frac{F}{m} \right]$ )  
L = largo de la placa  
W = ancho de la placa  
thk = espesor de la placa

Desplazamiento (Estático):

$$\Delta W = \frac{d_{31} \cdot V \cdot W}{thk} \quad (2.1.4.29)$$

$$\Delta L = \frac{d_{31} \cdot V \cdot L}{thk} \quad (2.1.4.30)$$

$$\Delta thk = d_{33} \cdot V \quad (2.1.4.31)$$

En donde:

- W = ancho de la placa  
L = largo de la placa  
thk = espesor de la placa  
d = constante piezoeléctrica  
V = voltaje aplicado

Voltaje (Estático):

$$V = \frac{g_{31} \cdot F_1}{W} \quad (2.1.4.32)$$

$$V = \frac{g_{31} \cdot F_2}{L} \quad (2.1.4.33)$$

$$V = \frac{g_{33} \cdot F_3 \cdot thk}{L \cdot W} \quad (2.1.4.34)$$

En donde:

- V = voltaje inducido  
g = campo de circuito abierto/esfuerzo aplicado  
F = fuerza aplicada  
L = largo de la placa  
W = ancho de la placa



thk =            espesor de la placa

Las características del bimorph utilizado, cuyo material cerámico piezoeléctrico es de tipo PZT 5A1 desarrollado por Morgan Technical Ceramics, son:

| Propiedad                                      | Símbolo             | Unidad                                | PZT 5A1   |
|--|---------------------|---------------------------------------|-----------|
| <b>Eléctricas (Campo eléctrico débil)</b>      |                     |                                       |           |
| Permisividad Relativa                          | $\epsilon_r^{T33}$  | -                                     | 1875      |
| Pérdida dieléctrica                            | $\tan\delta$        | -                                     | 0.02      |
| Resistividad a 25 °C                           | $\rho_{el}$         | $\Omega m$                            | $10^{12}$ |
| <b>Electromecánicas</b>                        |                     |                                       |           |
| Factores de acoplamiento                       | $k_p$               | -                                     | 0.62      |
|  | $k_{15}$            | -                                     | 0.69      |
|  | $k_{31}$            | -                                     | -0.34     |
|  | $k_{33}$            | -                                     | 0.67      |
|  | $k_t$               | -                                     | 0.45      |
| Constantes de carga o constantes de tensión    | $d_{33}$            | $\times 10^{-12}$ [C/N]               | 409       |
|  | $d_{31}$            | $\times 10^{-12}$ [C/N] o [m/V]       | -176      |
|  | $d_h$               | $\times 10^{-12}$ [C/N]               | 58        |
|  | $d_{15}$            | $\times 10^{-12}$ [C/N] o [m/V]       | -         |
| Constantes de voltaje o constantes de esfuerzo | $g_{33}$            | $\times 10^{-3}$ [Vm/N]               | 25.7      |
|  | $g_{31}$            | $\times 10^{-3}$ [Vm/N]               | -11       |
|  | $g_h$               | $\times 10^{-3}$ [Vm/N]               | 3.6       |
|  | $g_{15}$            | $\times 10^{-3}$ [Vm/N]               | -         |
|  | $d_h g_h$           | $\times 10^{-15}$                     | -         |
| Constantes de frecuencia                       | $N_p$               | Hz.m                                  | 2000      |
|  | $N_1$               | Hz.m                                  | 1370      |
|  | $N_3$               | Hz.m                                  | 1410      |
|  | $N_5$               | Hz.m                                  | -         |
|  | $N_a$               | Hz.m                                  | -         |
|  | $N_{3t}$ o $N_{33}$ | Hz.m                                  | -         |
|  | $N_5$               | Hz.m                                  | 1465      |
|  | $N_c$               | Hz.m                                  | 930       |
| $N_t$  | Hz.m                | 1940                                  |           |
| Factor de Calidad                              | $Q_m$               |                                       | 60        |
| <b>Mecánicas</b>                               |                     |                                       |           |
| Conformidades (Compliances)                    | $S_{33}^E$          | $\times 10^{-12}$ [m <sup>2</sup> /N] | 17.2      |
|  | $S_{11}^E$          | $\times 10^{-12}$ [m <sup>2</sup> /N] | 16.7      |
|  | $S_{12}^E$          | $\times 10^{-12}$ [m <sup>2</sup> /N] | -5.2      |
|  | $S_{13}^E$          | $\times 10^{-12}$ [m <sup>2</sup> /N] | -         |
|  | $S_{55}^E$          | $\times 10^{-12}$ [m <sup>2</sup> /N] | -         |
|  | $S_{66}^E$          | $\times 10^{-12}$ [m <sup>2</sup> /N] | -         |
|  | $S_{33}^D$          | $\times 10^{-12}$ [m <sup>2</sup> /N] | 9.4       |
|  | $S_{11}^D$          | $\times 10^{-12}$ [m <sup>2</sup> /N] | 15        |

|                      |            |  |      |
|----------------------|------------|--|------|
|                      | $S_{12}^D$ | $\times 10^{-12} \text{ [m}^2/\text{N]}$ | -7.1 |
|                      | $S_{66}$   | $\times 10^{-12} \text{ [m}^2/\text{N]}$ | 43.7 |
|                      | $Y_{33}^E$ | $\times 10^{10} \text{ [N/m}^2]$         | -    |
|                      | $Y_{11}^E$ | $\times 10^{10} \text{ [N/m}^2]$         | -    |
|                      | $Y_{33}^D$ | $\times 10^{10} \text{ [N/m}^2]$         | -    |
|                      | $Y_{11}^D$ | $\times 10^{10} \text{ [N/m}^2]$         | -    |
| Densidad             | P          | $\text{Kg/m}^3$                          | 7750 |
| Datos Térmicos       |            |  |      |
| Temperatura de Curie | $T_c$      | $^{\circ}\text{C}$                       | 370  |

Fig. 2.1.4.5 Propiedades del piezoeléctrico de tipo cerámico PZT 5A1 empleado. [31]

## 2.2. Estado del arte

Actualmente se encuentran en etapa de desarrollo y pruebas una gran cantidad de dispositivos con los que se pretende aprovechar la energía eólica en aquellas zonas en las que las turbinas convencionales no son eficientes o viables. La mayoría de los dispositivos que se están estudiando tienen principios de funcionamiento semejantes, muchos de ellos dependen de electromagnetismo o piezoelectricidad, y la mayoría se enfocan en resolver necesidades energéticas a menores escalas que las turbinas convencionales.

A continuación se presentan las ideas y los sistemas más actuales, algunos siguen en etapas de desarrollo y mejoramiento, mientras que otros ya se han comenzado a utilizar en aplicaciones de baja potencia.

### 2.2.1. Sistemas no convencionales para aprovechamiento de energía eólica.

#### 2.2.1.1. Wind-Belt

Consta de una banda polimérica que se somete a una corriente de aire con la cual comienza a vibrar debido al fenómeno de aeroelasticidad [26]. Uno de sus extremos se mantiene fijo y del otro lado tiene un imán colocado entre dos bobinas. Cuando la banda se mueve el imán sube y baja produciendo cambios en un campo magnético e induciendo una corriente en las bobinas. Las bobinas se conectan a una etapa de acondicionamiento y posteriormente a una batería para almacenar la energía producida y poderla transmitir de forma continua.

El estado actual de este dispositivo se puede dividir de acuerdo a su enfoque:

Micro escala: para garantizar la autonomía de sensores de esfuerzo en puentes o de temperatura.

Mediana escala: alrededor de un metro de largo, capaces de recargar teléfonos celulares o de iluminar mediante LEDs.

Mayor escala: arreglos de Wind-Belts de mediana escala de forma modular, con lo que se puede alimentar aplicaciones de mayor demanda dependiendo del número de dispositivos que se tengan.

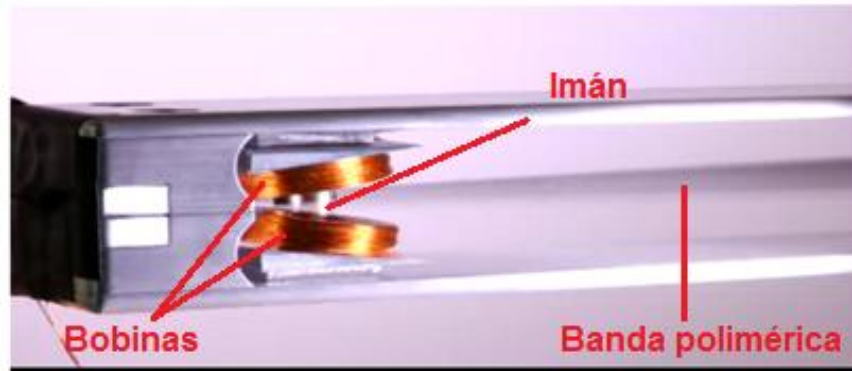


Fig. 2.2.1.1.1 Zona del Wind-Belt en la que se ubica el imán entre el arreglo de bobinas.

[26]

### 2.2.1.2. Windstalk

Consiste en un proyecto que contempla un conjunto de 1203 postes de resina reforzados por fibra de carbono. El diámetro de éstos es de 300 [mm] en su base y va disminuyendo hasta llegar a los 50 [mm] en la parte superior a través de una longitud de 55 metros. En su interior se encuentran discos de polímeros piezoeléctricos (PVDF) apilados pero divididos por electrodos. Estos se conectan a través de un par de cables, uno que conecta los electrodos positivos y otro a los negativos, simulando una conexión en paralelo. Cada cable recorre desde la punta hasta la base del poste.

Cuando el poste se balancea debido a fuerzas de arrastre ocasionadas por el viento los discos se comprimen generando energía eléctrica. Estos dispositivos se anclan al piso por bases de concreto de entre 20 y 30 metros de diámetro. En la punta cada poste tiene un LED que indica la intensidad de energía que se está generando de una manera estética [13].

En la base se coloca un generador que opera con esfuerzo de torsión. Debajo de las bases del campo de Windstalk existen dos cámaras conectadas por bombas hidráulicas. De tal manera que parte de la energía generada al soplar el viento bombea agua de la cámara inferior a la superior y en caso de que el viento cese se deje caer el agua a través de las bombas convirtiéndolas en generadores.

Actualmente es apenas una propuesta realizada para un concurso de ciudad autosustentable con energías renovables en los suburbios de Abu Dhabi. El proyecto no se ha puesto en práctica y aún no se ha aprobado.

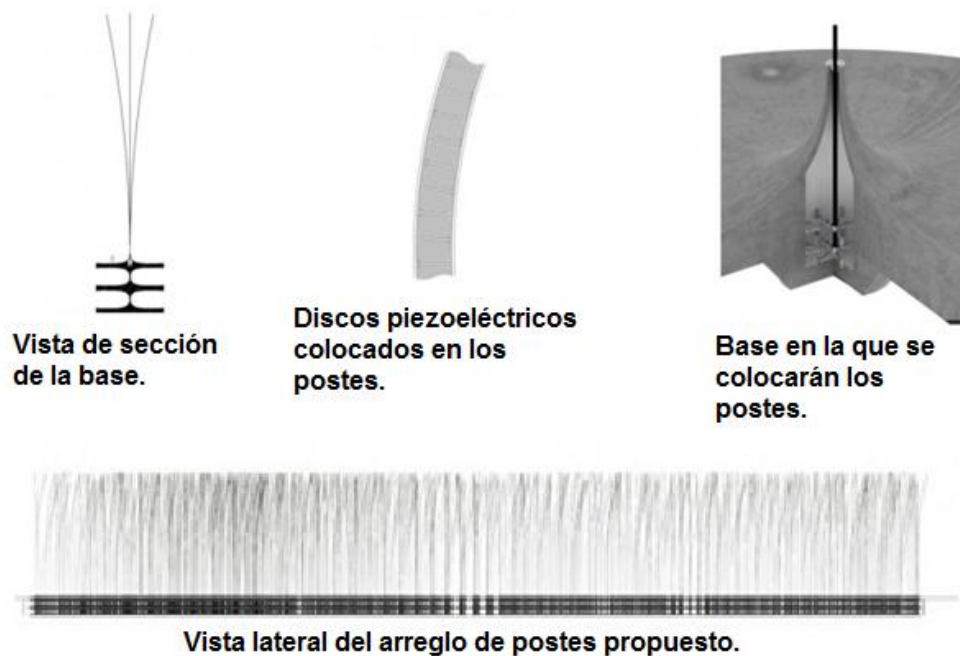


Fig. 2.2.1.2.1 Imágenes del prototipo de Windstalk propuesto para un concurso de ciudad autosustentable en los suburbios de Abu Dhabi. [22]

### 2.2.1.3. Vibro-Wind

Consiste en un marco metálico en el cual se colocan cada cierta distancia cubos o cuerpos geométricos de materiales poliméricos que vibran con el movimiento del aire alrededor de ellos. Estos cuerpos se conectan a un arreglo de materiales piezoeléctricos de tipo polimérico, que transducen dichas vibraciones en variaciones de voltaje y corriente eléctrica. Las vibraciones de estos cuerpos son producidas por el efecto de los vórtices generados y en menor medida por el arrastre de las corrientes de aire.

Actualmente se encuentra en investigación por el Departamento de Ingeniería de la Universidad de Cornell. El proyecto de investigación es liderado por el Dr. Francis Moon y cuenta con la participación de ingenieros eléctricos, mecánicos y arquitectos.

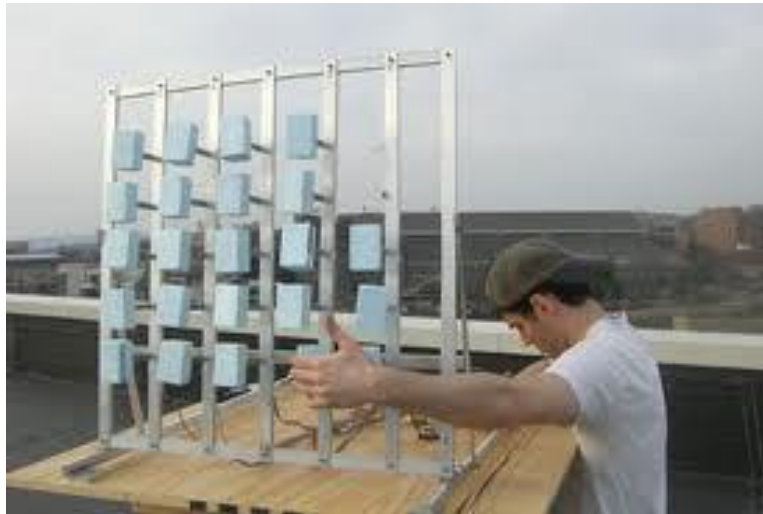


Fig. 2.2.1.3.1 Arreglo de Vibro-Wind colocados en tejados para pruebas con corrientes de viento reales. [19]

#### 2.2.1.4. Piezo-Leaf

Su principio de funcionamiento es muy parecido al del dispositivo anterior excepto que el arreglo de cuerpos vibratorios se coloca en una especie de estructura similar a un árbol. Estos cuerpos tienen forma triangular, cuyo diseño está basado en cómo se mueven las hojas de los árboles [19].

Éstas se conectan mediante unas bisagras a un arreglo de materiales cerámicos piezoeléctricos, que se deforman cíclicamente y transforman dichas vibraciones en variaciones de voltaje y corriente eléctrica. Las vibraciones de estos cuerpos son producidas por los vórtices generados y por el efecto de arrastre de las corrientes de aire, al igual que en el caso del Vibro-Wind.

Esta es otra de las propuestas del Departamento de Ingeniería de la Universidad de Cornell.

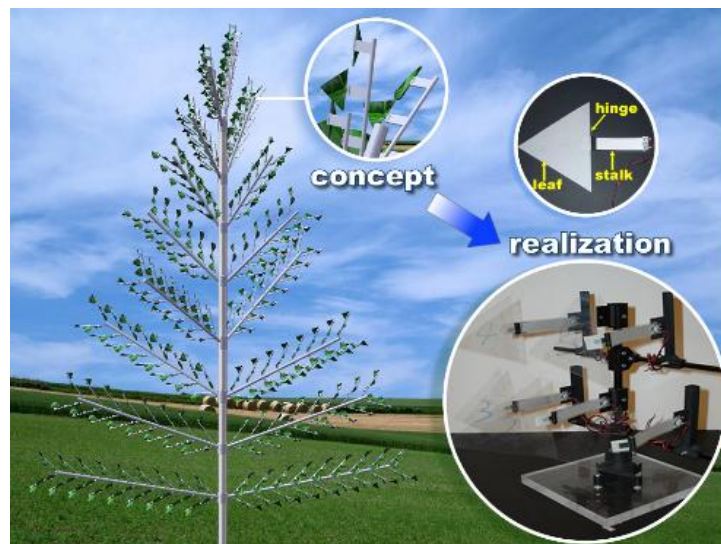


Fig. 2.2.1.4.1 Concepto inicial del Piezo-Leaf y muestra de un prototipo. [20]

#### 2.2.1.5. MARS (Magen Air Rotor System)

Es una especie de globo o zeppelin cuyo interior está relleno de helio de forma que pueda mantenerse a una altura de alrededor de 300 metros. Cuenta con membranas que se comportan como álabes de forma que el arreglo pueda girar sobre un eje horizontal. Este sistema permite capturar la energía disponible en las corrientes de aire ubicadas entre los 200 y 300 metros de altura [24]. Incluyendo las corrientes de chorro nocturnas, las cuales se encuentran en prácticamente cualquier lugar del cielo terrestre. La energía se envía mediante cables a tierra.

Actualmente permanece como una propuesta del profesor Ken Caldeira del departamento de Ecología Global en Carnegie Institution for Science. Se ha realizado una etapa de prueba en Canadá, donde la FAA (Federal Aviation Administration) observó su funcionamiento. Se tomaron pedidos para iniciar su comercialización en 2011 pero desde entonces ha perdido fuerza la investigación.



Fig. 2.2.1.5.1 Prototipo de MARS en su etapa de pruebas en Canadá. [24]

### 2.2.1.6. Generador de energía eólica sin álabes (Bladeless Wind Power Generator)

El sistema se compone por unidades de potencia modulares las cuales agrupan 36 túneles de viento tipo jet. El arreglo de túneles está montado en cascada dentro de un marco que sirve de sujeción.

Presenta un arreglo en cantiléver que está compuesto por una capa de latón envuelta a manera de sándwich por dos capas formadas por un electrodo y una capa de polifluoruro de vinilideno (PVDF), que es un material piezoeléctrico [30]. Cada unidad modular de potencia es montada en una caja, y un conjunto de cajas son agrupadas en un panel adjunto a un pedestal.

El dispositivo se encuentra patentado aunque no existe mucha información sobre dispositivos ya instalados y funcionando.

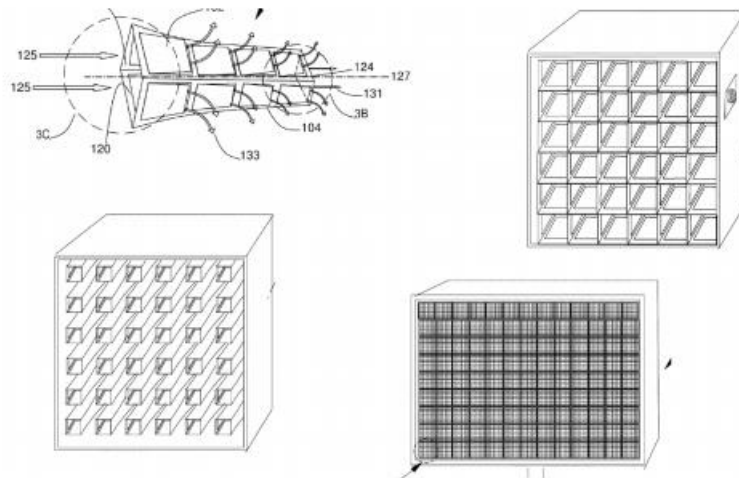


Fig. 2.2.1.6.1 Imágenes descriptivas de la patente del “Bladeless Wind Power Generator”. [30]



2.2.1.7. Generadores de energía eólica utilizando material piezoeléctrico y mecanismo auxiliar  
(Wind Energy Generators Using Piezoelectric Material and Auxiliary Mechanism Thereof)

Este dispositivo se compone por un piezoeléctrico y un mecanismo auxiliar. El mecanismo auxiliar está compuesto por un dispositivo recolector de viento y uno accionador [29].

El dispositivo colector de aire recolecta y acelera la velocidad del viento. El dispositivo de accionamiento coopera en la recolección de aire y está en contacto con el material piezoeléctrico, en el momento en que el flujo de aire ingresa este transmite vibraciones al piezoeléctrico para generar electricidad.

Al igual que el dispositivo anterior, se encuentra patentado pero se tiene poca información sobre su aplicación.

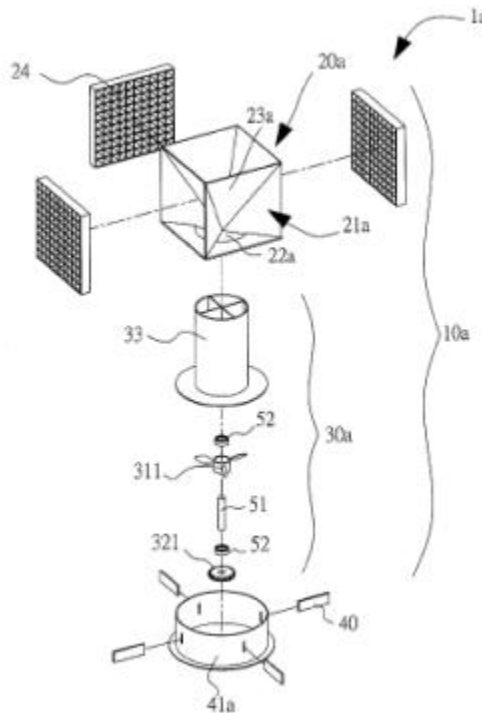


Fig. 2.2.1.7.1 Imagen del arreglo “Wind Energy Generators Using Piezoelectric Material and Auxiliary Mechanism Thereof”. [29]

### 2.2.1.8. Generador de energía eólica y velocímetro (Wind Power Generator and Velocimeter)

Este dispositivo consta de un conducto con pared de pendiente variable y un deflector en el camino del flujo. Éste tiene una serie de transductores piezoeléctricos posicionados en una secuencia determinada. El flujo de aire será direccionado con el conducto, en donde los deflectores le provocarán vórtices. La presión de estos vórtices afectará a los piezoeléctricos, deformándolos y generando de esta manera electricidad [27].

Al igual que los dos dispositivos anteriores, se encuentra patentado pero se tiene poca información sobre su aplicación.

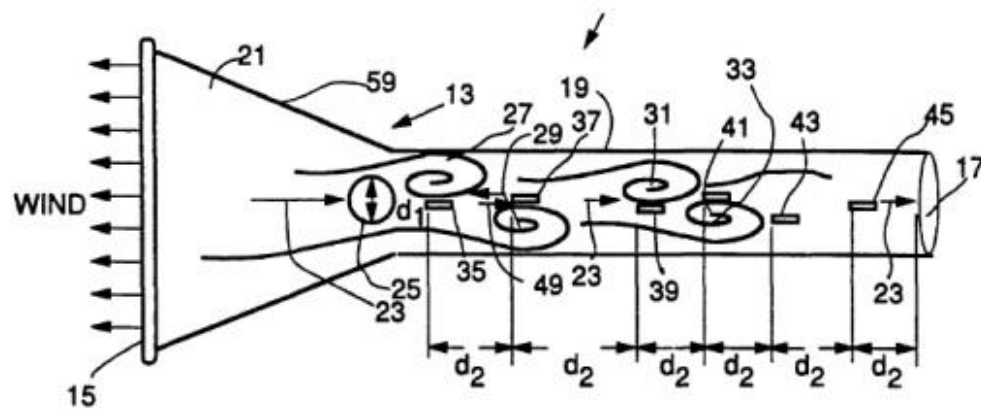


Fig. 2.2.1.8.1 Figura esquemática del "Wind Power Generator and Velocimeter", en donde se puede apreciar la colocación de los piezoeléctricos y los vórtices que los deforman. [27]

### 2.2.1.9. Aeroflexor

El Aeroflexor consiste en un ala flexible y curva conectada en sus extremos a soportes estructurales por medio de mecanismos de rotación de tal manera que se le permita al ala girar libremente alrededor de un eje central formado por la alineación de ambos rodamientos.

Uno de los soportes está fijo y el otro está unido a un elemento retroactivo como puede ser una masa o un resorte. Al someter el dispositivo a una corriente de aire, las fuerzas de sustentación en el ala ocasionan tanto rotación como cambios en la forma y en la posición de ésta con respecto al centro de giro. Esto genera una oscilación longitudinal en sus extremos.

La energía provocada por dicho vaivén es luego utilizada en un elemento de transferencia de fuerza como un generador eléctrico, una bomba, entre otras aplicaciones.

Es un dispositivo que está patentado y es estudiado por su creador David Labrecque, investigador de la Universidad de Maine. Se ha probado su variante hidráulica llamada Hydroflexor de la cual se publicó un artículo. Anteriormente solían venderse planos de modelos a escala del dispositivo.



Fig. 2.2.1.9.1 Modelo de Aeroflexor. [19]

## 2.2.2. Descripción detallada de los dispositivos seleccionados

Se eligieron tres dispositivos de los presentados anteriormente para trabajar en su diseño, construcción y evaluación en el túnel de viento. De esta forma se adaptaron los diseños de forma que se obtuviera una potencia eléctrica aprovechable y entonces pudieran ser comparados.

Los dispositivos elegidos son el Aeroflexor, el Piezo-Leaf y el Vibro-Wind.

### 2.2.2.1. Aeroflexor

Se describe en la patente con número de publicación US 2009/0285668 A1 [28], titulada ROTATING FLEXIBLE WING POWER SYSTEM por su creador David Labrecqu, investigador de la Universidad de Maine.

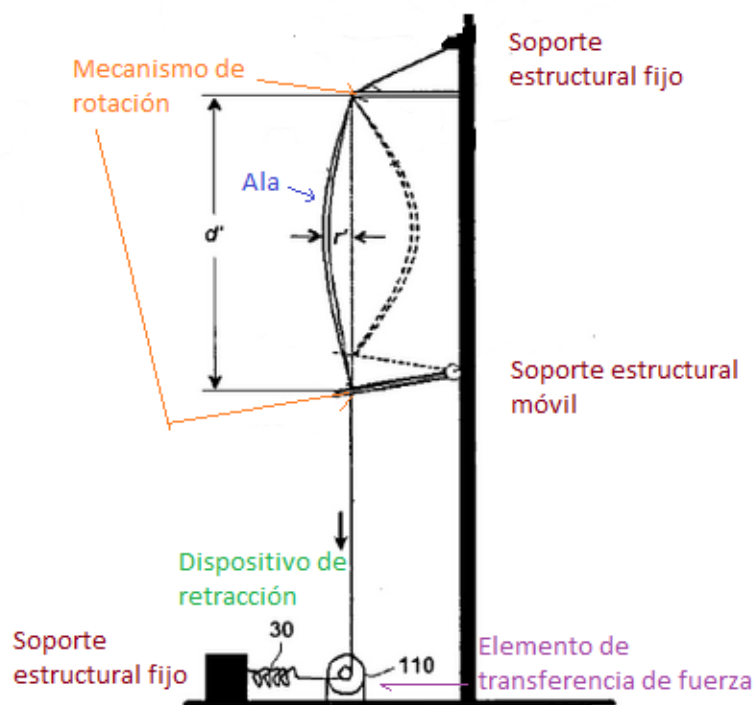


Fig. 2.2.2.1.1 Componentes del Aeroflexor acoplado a un generador.

Consiste en un ala flexible y curva conectada en sus extremos a soportes estructurales por medio de mecanismos de rotación de tal manera que se le permita al ala girar libremente alrededor de un eje central formado por la alineación de ambos rodamientos. Uno de los soportes estará fijo y el otro estará unido a un elemento retroactivo como sería una masa o un resorte. Al someterla a una corriente de aire, las fuerzas de sustentación en el ala ocasionan tanto rotación como cambios en la forma y en la posición de esta con respecto al centro de giro, lo cual provoca una oscilación longitudinal en sus extremos. La energía provocada por dicho vaivén es luego utilizada

en un elemento de transferencia de fuerza como un generador eléctrico, una bomba, etc.

#### Principio de funcionamiento

Al parecer la forma más sencilla de abordar dicha explicación es a través del diagrama de cuerpo libre del perfil aerodinámico de un generador Darrieus. En la primera figura se observa el perfil de un ala en cuatro posiciones distintas. Suponiendo que el generador rota en sentido antihorario, el perfil deberá vencer la resistencia del aire a dicha rotación. En la Fig. 2.2.2.1.2. se aprecia cómo cambian dichas fuerzas al someter al perfil a una corriente de aire constante. En la última imagen se muestran en rojo las fuerzas de sustentación provocadas por las resultantes del aire. En este caso las fuerzas de arrastre no se muestran ya que se supone el ángulo de ataque no sobrepasa los  $15^\circ$ , rango donde el arrastre puede ser despreciable.

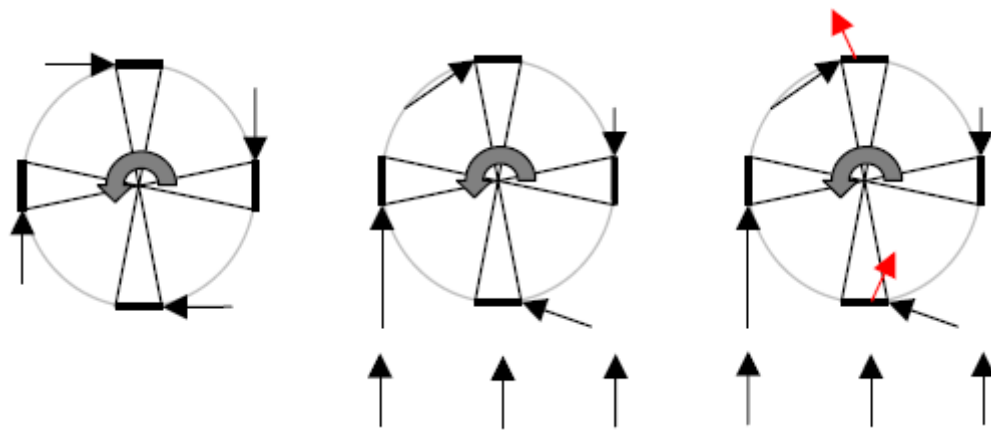


Fig. 2.2.2.1.2 Fuerzas presentes en el arreglo Aeroflexor sometido a una corriente de aire.

Si se descomponen las fuerzas de sustentación en una dirección radial y otra tangencial, se podría apreciar que las primeras contribuirán a cambiar el radio del ala y las segundas provocarán la rotación del ala alrededor del eje definido por la posición de los mecanismos de rotación. En el generador Darrieus se diseña para soportar las cargas radiales, pero en el caso del Aeroflexor, se aprovechan dichas fuerzas para lograr la oscilación longitudinal de los extremos del ala junto con las fuerzas centrífugas provocadas por la masa del ala.

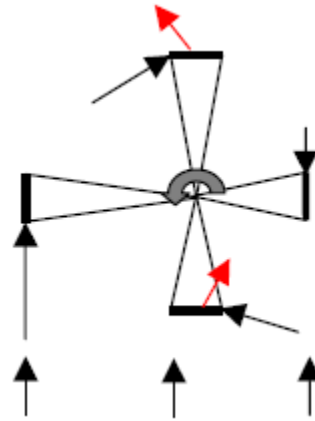


Fig. 2.2.2.1.3 Fuerzas aprovechadas por el Aeroflex cuando se encuentra sometido a la incidencia de una corriente de aire.

Como se aprecia en los diagramas, la fuerza de sustentación varía a lo largo de cada revolución del ala afectando directamente la fuerza que se experimenta de manera longitudinal por lo que para efectos de su estudio se supondrá que ésta varía de una manera lineal de tal forma que si se colocara un dinamómetro en su extremo inferior (Fig. 2.2.2.1.4.) y se graficara la fuerza registrada con respecto a la distancia y otra con respecto al tiempo, se obtendría gráficas muy similares a las siguientes:



Fig. 2.2.2.1.4 Dinamómetro colocado en el extremo inferior del ala.

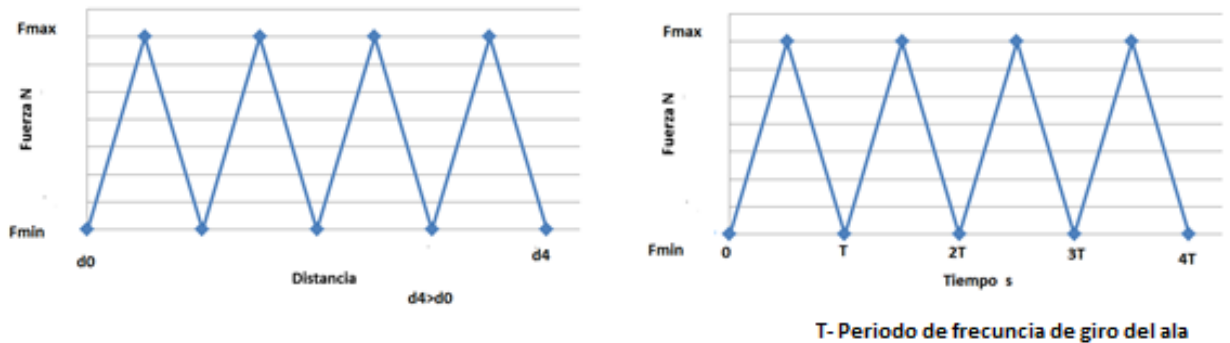


Fig. 2.2.2.1.5 Forma de las gráficas de la fuerza registrada en el dinamómetro con respecto a la distancia desplazada y con respecto al tiempo.

De acuerdo a las consideraciones anteriores la fuerza puede representarse con la siguiente ecuación:

$$F(x) = \left[ \frac{(F_{m\acute{a}x} - F_{m\acute{i}n})}{(x_f - x_0)} \right] x + F_{m\acute{i}n} \quad (2.2.2.1.1)$$

Donde x es la distancia.

Para obtener el trabajo del dispositivo se tendra que integrar con respecto al desplazamiento. En este caso se integrara por partes ya que de lo contrario el trabajo se anulara al tratarse de una función par. Debido a esto las integrales se evaluarán desde cero hasta la magnitud de la distancia por ciclo.

$$\begin{aligned} W_{Aeroflexor} &= \int_0^d F(x) dx \\ &= \left[ \left[ \frac{(F_{m\acute{a}x} - F_{m\acute{i}n})}{(x_f - x_0)} \right] \frac{x^2}{2} + F_{m\acute{i}n} x \right]_{x=d} \\ &\quad - \left[ \left[ \frac{(F_{m\acute{a}x} - F_{m\acute{i}n})}{(x_f - x_0)} \right] \frac{x^2}{2} + F_{m\acute{i}n} x \right]_{x=0} \end{aligned} \quad (2.2.2.1.2)$$

De tal manera que la potencia queda dada por:

$$\dot{W}_{Aeroflexor} = \frac{W_{Aeroflexor}}{t} \quad (2.2.2.1.3)$$

Donde el tiempo puede obtenerse de:

$$t = \frac{0.5}{f_{vela}} = \frac{T}{2} \quad (2.2.2.1.4)$$

$$T = \frac{1}{f} \quad (2.2.2.1.5)$$

Descripción detallada de los componentes de un Aeroflexor

Ala

El ala debera estar compuesta por un material que resista esfuerzos a tensión pero siga siendo flexible. El autor recomienda utilizar Kevlar® o fibra de carbono. El ala contiene elementos estructurales y estabilizadores de masa de tal manera que se conserve un perfil aerodinámico durante todos los puntos de la rotación gracias a fuerzas centrífugas, se conserve el momento angular a través del cambio de radio y se logre que el generador rote únicamente en el sentido que conserve el borde de ataque al inicio. La distribución de masa debera de colocarse de tal manera que la

fuerza de sustentación actúe en el centro de gravedad del perfil impidiendo que el perfil cabecee. De acuerdo con [18] en el caso de que el perfil aerodinámico sea simétrico, el centro de gravedad se encontrará a una distancia de 25% de la longitud de la cuerda del perfil con respecto al borde de ataque. Para su análisis, el autor recomienda ignorar las fuerzas de arrastre en el perfil ya que la elevada velocidad de rotación del ala provoca que el ángulo de ataque no sobrepase los 15°, dónde el coeficiente de arrastre es despreciable.

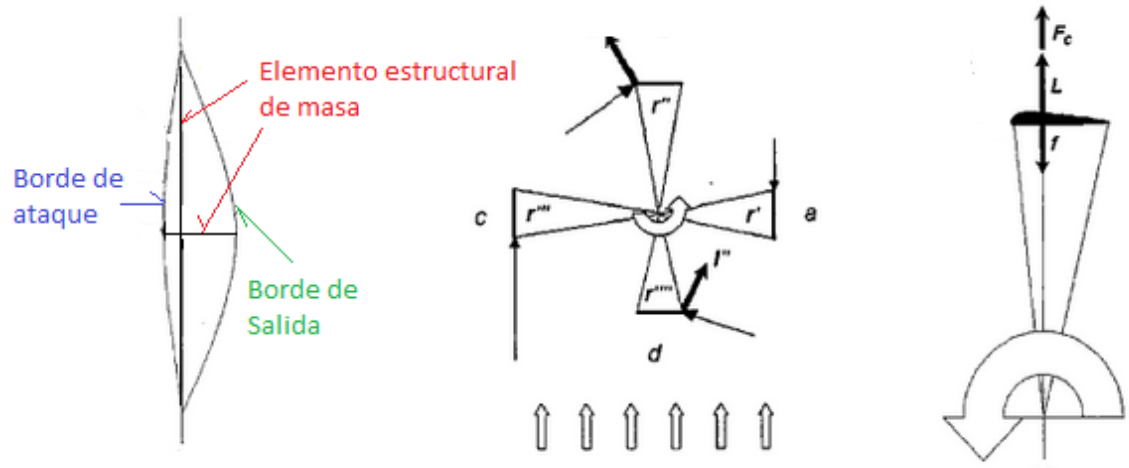


Fig. 2.2.2.1.6 Componentes del Aeroflexor y fuerzas involucradas en ellos.

#### Mecanismos de rotación

Corresponden a cualquier estructura mecánica que permita al ala rotar libremente con respecto a los soportes estructurales como es el caso de cojinetes.

#### Dispositivo de retracción

Se refiere a cualquier dispositivo de almacenamiento de energía que permita la oscilación de la longitud del radio al someter el Aeroflexor a una corriente de aire perdiendo la menor cantidad de energía posible como podría ser el caso de resortes, masas, imanes, etc.

#### Elemento de transferencia de fuerza

En cargo de transmitir las fuerzas longitudinales a otro mecanismo encargado de la transducción de energía como podría ser un generador eléctrico o bomba.

#### Conexiones entre elementos

La conexión entre los elementos podrá ser directa o a través de amarres. Se recomienda utilizar mecanismos guía, para contrarrestar el movimiento lateral de los extremos del ala y así obtener una mayor eficiencia.



### 2.2.2.2. Piezo-Leaf

#### Principio de funcionamiento

El dispositivo denominado “Piezo-Leaf” consiste en un arreglo de piezas de forma triangular colocadas en una estructura asemejando un árbol, estos componentes están unidos a un piezoeléctrico de manera que se deforme cuando el viento mueve dichos componentes como consecuencia del efecto de la fuerza de arrastre y de la aparición de vórtices de von Kármán de diferentes magnitudes en cada una de las caras del arreglo. De ahí que el nombre haga referencia a las hojas de un árbol y a un piezoeléctrico. Este arreglo se basa en el propuesto por el programa “Creative Machines”<sup>1</sup> del Departamento de Ingeniería de la Universidad de Cornell.

El arreglo consiste en colocar el piezoeléctrico PZT 5A12 en cantiléver, pero con su cara más angosta paralela al piso, de forma que se pueda anclar fácilmente en una estructura metálica por uno de sus extremos, y por el otro se pueda sujetar un arreglo en el que se encuentra la figura geométrica triangular que semejante a una hoja y que será la que ayude a transmitir el movimiento causado por el viento para deformar el piezoeléctrico antes mencionado, debido a que será el elemento que generará las fuerzas de arrastre cuando el viento incida sobre él.

Puesto que únicamente contamos con un tipo de piezoeléctrico, un material y una medida específica, lo que se puede variar de acuerdo a las diferentes condiciones de uso es la punta, es decir, el tamaño de la pieza en forma de hoja y si ésta se encuentra anclada a un brazo de palanca para incrementar la deformación del piezoeléctrico, este brazo también puede ser variado en longitud de acuerdo a las necesidades energéticas o a las condiciones del entorno en el que funcionará.

Cuando el arreglo reciba una corriente de aire vibrará bajo un régimen irregular, de forma que el bimorph piezoeléctrico será el que limite el movimiento y regrese el arreglo a su posición original, ayudado por supuesto por los vórtices de von Kármán [3] que se formarán a cada lado del dispositivo cuando incida el aire y que provocarán fuerzas que harán que el arreglo esté constantemente vibrando, estos vórtices actuarán como se muestra en la Fig. 2.2.2.2.1. Cuando este piezoeléctrico se deforme debido a dicha vibración, se generará una diferencia de potencial y una corriente eléctrica entre las dos caras perpendiculares al eje de polarización que se está utilizando, en este caso el eje de polarización es aquel en el que se encuentra la cara más angosta, es decir en el espesor del bimorph.

---

<sup>1</sup> “Creative Machines” es un programa del Departamento de Ingeniería de la Universidad de Cornell, en Ithaca, New York. Los responsables de dicho programa son Francis Moon, Shu-guang Li y Hod Lipson.

<sup>2</sup> PZT 5A1 manufacturado por la empresa Morgan Technical Ceramics.

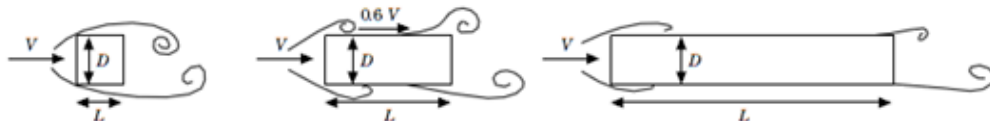


Fig. 2.2.2.2.1 Se muestran las clases de vórtices observados en cuerpos prismáticos de diferente longitud. [3]

Puesto que este componente presenta una deformación máxima para la cual se pierden sus propiedades piezoeléctricas, se limita el tamaño tanto del brazo de palanca como de la pieza triangular, evitando así que las dimensiones sean excesivas y el piezoeléctrico se deforme hasta límites cercanos al esfuerzo de cedencia, lo que significaría que las características piezoeléctricas podrían verse comprometidas o perdidas por completo. Este movimiento repetido nos entregará una corriente alterna cuya frecuencia y magnitud dependerán de la fuerza del viento y sus características al momento de incidir en el arreglo, por lo que la energía eléctrica se tiene que adecuar para su posterior utilización.

A diferencia de otros sistemas o arreglos transductores de energía eólica, los que emplean piezoeléctricos como elemento transductor, fuerza a transformar la energía del viento en eléctrica. Esta limitación puede llegar a ser un inconveniente para algunas aplicaciones, pues tendría que tenerse una doble transducción de energía, de eólica a eléctrica y posteriormente de eléctrica a mecánica, térmica o la que se pretendiera emplear. En este aspecto es en el que se encuentra la mayor limitación del Piezo-Leaf, sin embargo los piezoeléctricos actuales permiten obtener energía eléctrica sin necesidad de tener mucho movimiento, deformaciones muy grandes o frecuencias muy elevadas, y es en esto en lo que radica la posible ventaja del Piezo-Leaf. Sobre todo si se considera que puede obtenerse energía eléctrica en zonas con poco viento debido a estas características.

Descripción detallada de los componentes de un Piezo-Leaf

Bimorph piezoeléctrico / Brazo de palanca

Dependiendo de la longitud del bimorph piezoeléctrico utilizado, así como del material que esté hecho, principalmente PVDF (Polifluoruro de Vinilideno) o PZT (Plomo-Zirconato-Titanato), el arreglo puede o no utilizar un brazo de palanca. Esto se debe a que algunos arreglos bimorph son lo suficientemente largos como para fungir como brazo de palanca también. Este componente se encarga de realizar la transducción de energía mecánica en energía eléctrica, pues al deformarse se genera la diferencia de potencial y la corriente eléctrica aprovechada posteriormente.

En caso de que el piezoeléctrico no sea suficientemente largo se puede agregar un brazo de palanca entre éste y la masa en la punta de forma que se tenga una mayor deformación con la incidencia del viento.

### Geometría triangular en la punta

Estos componentes pueden tener diferentes tamaños y diseños aunque se pretende que sean lo más semejante a las hojas de un árbol. Sirven como masa en la punta del arreglo, para propiciar la deflexión y aumentar la deformación del piezoeléctrico. Se intenta que sean también geometrías que ayuden a formar los vórtices de von Kármán que ayudarán en la deformación del piezoeléctrico.

### Estructura de soporte

Suele estar fabricada de acero y sirve para sujetar y ubicar a diferentes alturas los arreglos de bimorph con geometría triangular. También se utiliza para proteger y sujetar los cables que provienen de cada electrodo de los bimorphs y enviar dichos cables a la base del arreglo.

### Elementos de fijación

Son tornillos y tuercas principalmente, empleados para colocar y asegurar los piezoeléctricos y unirlos con las geometrías triangulares y la estructura de soporte. Asimismo se emplean para anclar la estructura de soporte al sitio donde se quiera colocar la base de la misma.

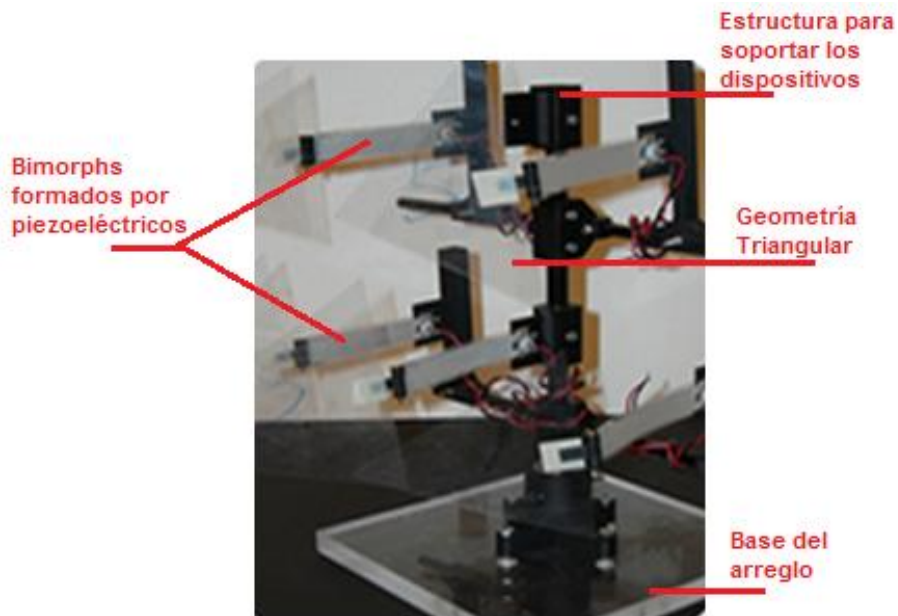


Fig. 2.2.2.2.2 Componentes del arreglo Piezo-Leaf [19].

### 2.2.2.3. Vibro-Wind

#### Principio de funcionamiento

El Vibro-Wind tiene el mismo principio de funcionamiento que el Piezo-Leaf acerca de las cargas provenientes de las fuerzas aerodinámicas presentes en un objeto inmerso en un fluido, pero la principal diferencia es que el primero utiliza un volumen mayor que el segundo para obtener una mayor captación de aire y por consiguiente de energía. Además cuenta con una masa mayor, con la cual incrementa la inercia y así aumenta la fuerza aplicada en la deformación del piezoeléctrico empleado.

En este dispositivo la pieza al final del cantiléver es un cubo el cual al momento de incidir el viento genera vórtices los cuales producen vibraciones en la pieza y con la ayuda de un brazo de palanca se consigue amplificar estas vibraciones en el piezoeléctrico y obtener un voltaje aprovechable.

El arreglo fue pensado para que se pudiera poner en una mayor densidad que las turbinas eólicas convencionales puesto que la geometría no se ve afectada en gran medida por los dispositivos que la rodean, de forma que se puedan obtener corrientes eléctricas cuya magnitud sea suficiente para alimentar distintos dispositivos.

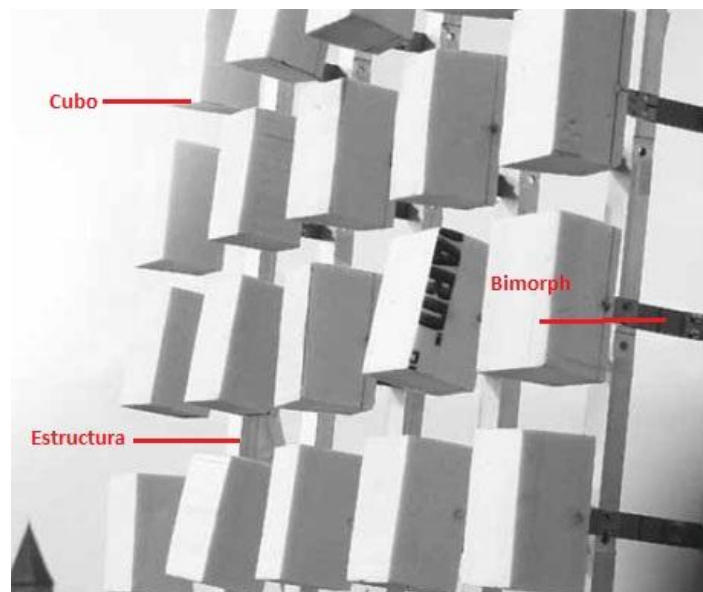


Fig. 2.2.2.3.1 Componentes del arreglo Vibro-Wind. [21]

#### Descripción detallada de los componentes de un Vibro-Wind

Debido a que el principio de funcionamiento del Vibro-Wind es el mismo que el del Piezo-Leaf, la descripción de algunos de sus componentes se comparte, este es el caso del bimorph piezoeléctrico, el brazo de palanca, la estructura de soporte y los elementos de fijación.

### Geometría tetraédrica en la punta

Esta geometría es un cubo, el cual da origen a vórtices denominados de von Kármán (ver Fig. 2.2.2.1) y con los cuales se produce la excitación que genera las vibraciones en el piezoeléctrico [3].

### 3. CAPÍTULO III – Planteamiento del problema

Los requerimientos de energía de las sociedades actuales son tan elevados que los métodos comúnmente utilizados para la obtención de la misma ya no son capaces de satisfacer la demanda, por lo que deben de explorarse nuevas formas de generación.

Dentro de los métodos que se emplean actualmente para el aprovechamiento de la energía eólica existen algunos cuya instalación no es sencilla o incluso factible en algunas zonas debido a las características del viento y del entorno, por ejemplo las zonas urbanas. Por lo que a pesar de que el viento cuenta con energía disponible, no se puede captar para su posterior uso.

Lo que se busca es generar tres propuestas cuyo funcionamiento sea distinto al de las turbinas eólicas, para captar dicha energía en zonas cuyas características, ya sean principalmente de entorno, altura o velocidad del viento, no permitan la aplicación de los arreglos que se usan normalmente en las granjas eólicas. Para ello se caracterizarán y se compararán bajo circunstancias similares con el fin de conocer las geometrías y condiciones que sean más eficientes y generen la energía más aprovechable por el ser humano. La pregunta de investigación que se pretende responder es ¿se podría diseñar un dispositivo de captación de energía eólica que funcionara bajo el principio de los piezoeléctricos o de un arreglo imán/bobina, que presentara una mayor viabilidad en zonas urbanas?

## 4. CAPÍTULO IV – Construcción de dispositivos de captación de energía eólica.

*Se presentan los diseños de los bancos de pruebas para el túnel de viento empleado, así como las consideraciones de diseño que se realizaron para la construcción de los dispositivos antes elegidos.*

*Se muestran los cálculos teóricos relacionados con el Aeroflexor, el Piezo-Leaf y el Vibro-Wind (Giro-Wind), explicándose la razón por la que se hicieron algunas consideraciones así como también algunos cambios con respecto a los dispositivos presentados originalmente en el Capítulo II. Mostrándose los dispositivos finales que se sometieron a las pruebas en el túnel de viento.*

### 4.1 Banco de pruebas

Para la etapa experimental se utilizó el túnel de viento más grande disponible en el Laboratorio de Termofluidos de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, por lo que el banco de pruebas, las dimensiones de los dispositivos y la densidad de los mismos, estuvieron limitadas por el espacio útil dentro de éste. Asimismo la velocidad del viento a la que se probaron se encontró limitada por la frecuencia de giro del motor del túnel de viento. Esto debido a que la turbina del túnel de viento está acoplada mediante una banda a un motor eléctrico cuya frecuencia de funcionamiento podía ser determinada únicamente dentro de un rango específico (600 a 2400 [rpm]). Tomando todas estas consideraciones se diseñaron dos bases. La primera base que sirviera para probar los tres dispositivos de este trabajo en la “Prueba de eficiencia individual” y la segunda para realizar la “Prueba de densidad” del Aeroflexor.

#### Base Principal

Dicha base consiste en un rectángulo hecho de madera, con 500 milímetros de ancho y 900 milímetros de largo, de forma que se pueda colocar en la zona desmontable del túnel de viento y ésta se cubra por completo, para reducir pérdidas de aire dentro del túnel y por consiguiente, alteraciones en las mediciones. A esta base se le realizaron una serie de barrenos para poder colocar la base del Aeroflexor, así como una base giratoria para probar la eficiencia de los dispositivos Vibro-Wind y Piezo-Leaf a diferentes ángulos y conocer la diferencia de funcionamiento conforme cambie la incidencia del viento. Ver Fig. 4.1.1.

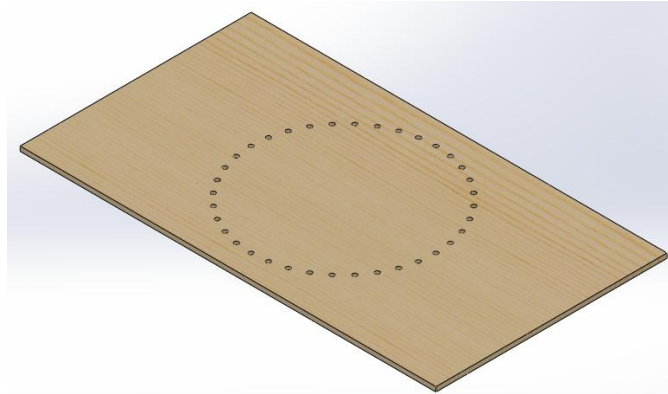


Fig. 4.1.1 Base principal para pruebas en el túnel de viento.

Para poder colocar la base de estos dos últimos dispositivos y hacerla girar, se realizaron barrenos sobre un círculo de 400 milímetros de diámetro y se construyó otra base de madera, pero circular de 450 milímetros de diámetro, la cual funge como base giratoria. Para poder cambiar el ángulo se realizaron tres barrenos en esta segunda base y dependiendo del ángulo que se pretenda estudiar, se orienta la misma y se fija a la base principal con tres tornillos. Ver Fig. 4.1.2.



Fig. 4.1.2 Base circular que permite el giro de la estructura para la prueba de Giro-Wind y Piezo-Leaf.

Asimismo la base del Aeroflexor consta de otro rectángulo de madera que se puede fijar a la base principal utilizando los barrenos realizados para la base circular, de forma que se redujeron los cambios de arreglos dentro del túnel de viento, pues muchos componentes se comparten y solamente es necesario atornillar y cambiar algunas piezas.

Debido a que el principio de funcionamiento del Aeroflexor varía con respecto al del Vibro-Wind y el Piezo-Leaf, la estructura metálica realizada para probar estos dos últimos no fue compatible con la de éste.

#### Estructura metálica para dispositivos piezoeléctricos

La estructura metálica para las pruebas de los dispositivos con piezoeléctricos consiste en una base metálica que se ancla a la base giratoria antes mencionada y a la que se le



ensamblan una serie de piezas para poder tener una barra delgada, de calibre 14 (1.90 [mm] de espesor, a fin de reducir su incidencia en los resultados), en la que se puedan atornillar a diferentes alturas las piezas en las que se atornilla a su vez, el piezoeléctrico. Posteriormente se puede colocar el arreglo específico de Vibro-Wind o de Piezo-Leaf. En el caso del primer dispositivo, el eje de polarización del piezoeléctrico se encuentra perpendicular a la base y al piso del túnel de viento, mientras que en el caso del Piezo-Leaf, se encuentra paralelo a estas referencias. Esto significa que se tienen dos diferentes componentes para fijar el piezoeléctrico a la estructura metálica.

Los diferentes barrenos a lo largo de la estructura aseguran que la capa límite cercana a las caras inferior y superior del túnel de viento no afectaran las mediciones. Para incrementar el número de barrenos y por consiguiente de alturas a las que se pueden probar los dispositivos, así como para reducir la vibración de la estructura. Evitando de esta forma que el piezoeléctrico pudiera estarse deformando por el movimiento de la estructura en sí, o que la estructura al no estar completamente fija estuviera disipando energía que podría ser aprovechada por el piezoeléctrico, se contaba con una estructura superior que se ensamblaba a la inferior y posteriormente se fijaba mediante un tornillo a la cara superior del túnel de viento. De esta forma se redujo la vibración de la estructura, pues se encuentra anclada en dos puntos.

Finalmente la base principal tiene barrenos para poder introducir el tubo de Pitot empleado para conocer las presiones y velocidades del viento antes de su incidencia con los dispositivos, así como a la salida de los mismos. Estos barrenos permiten también utilizar instrumentos de medición diferentes, como un anemómetro de hilo caliente.

En la figura 4.1.3. se puede observar el diseño de la estructura metálica para la colocación de los arreglos de Vibro-Wind y Piezo-Leaf.

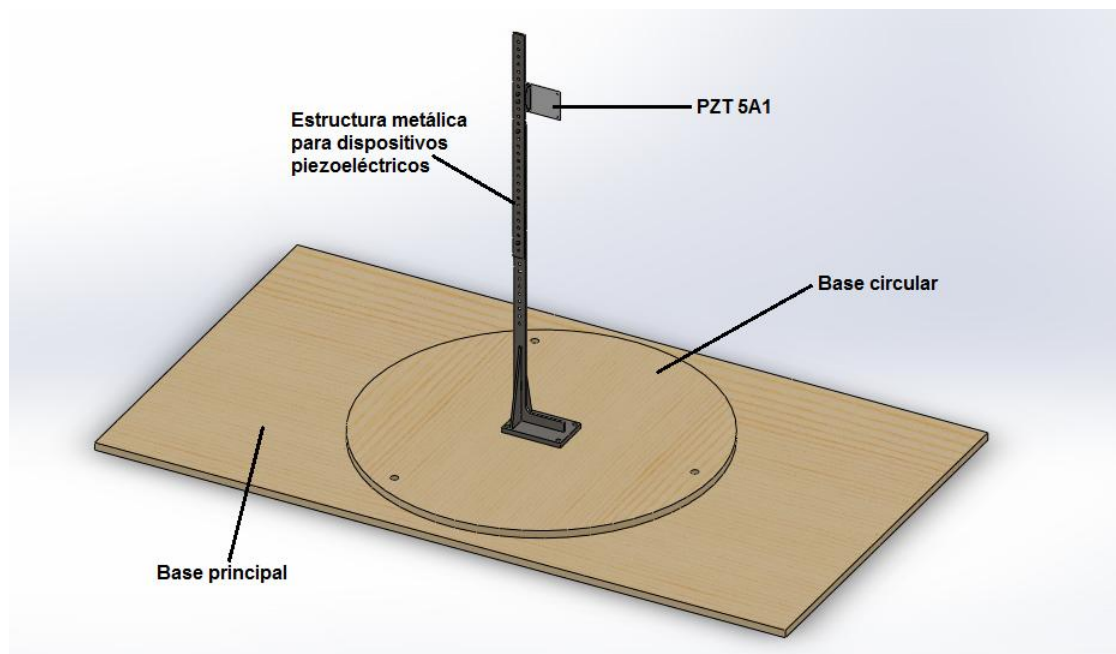


Fig. 4.1.3 Arreglo para las pruebas de Giro-Wind y Piezo-Leaf.

### Base Secundaria para el Aeroflexor

Ya que cumple una función muy similar a la primera, ésta consta de un rectángulo de Triplay de 900 X 500 [mm] con un espesor de 10 [mm] pero tiene una configuración de barrenos distinta. La segunda base permite ajustar dos Aeroflexors a la vez y modificar la distancia entre estos de manera longitudinal al túnel de viento.

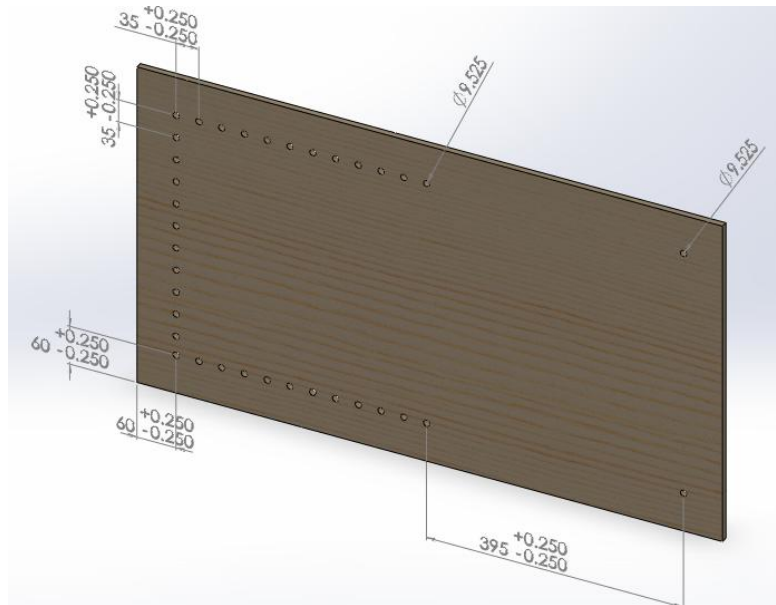


Fig. 4.1.4 Imagen de los lugares donde se barrenó la base secundaria para poder sujetar el Aeroflexor. (Valores en milímetros).

## 4.2 Aeroflexor

Se manufacturaron dos dispositivos. Uno que operó en su totalidad como generador eléctrico y otro que únicamente simuló el movimiento mecánico. Este último ayudó a realizar la prueba de densidad y facilitó mediciones mecánicas al no tener un elemento acoplado. Elementos como el ala, los cojinetes y partes específicas de la base se compartieron en ambos arreglos. A continuación se describe el diseño de cada componente.

### Diseño del Ala

Para una mejor explicación del diseño del ala la separaremos en las siguientes partes utilizando la nomenclatura señalada en la Figura 4.2.1.



Fig. 4.2.1 Esquema del Ala del dispositivo Aeroflexor.

#### Espina

Este elemento une a los dos rodamientos de los extremos y corre longitudinalmente a través de la vela. Atraviesa la cuerda en la cuarta parte de la longitud  $c$  desde el borde de ataque. La masa de este elemento deberá mantener la forma de arco de la vela vientos arriba pero ser lo suficientemente flexible para permitir que el ala se flexione longitudinalmente y pueda incluso enrollarse para su almacenamiento y transporte. Se optó por seguir la recomendación del autor al utilizar un fleje de acero inoxidable cortado a la mitad de su grosor y en sus extremos para poder unirse a los rodamientos. El acero inoxidable es del tipo W. Nr.4301 (AISI 304). Sus dimensiones comerciales consisten en un espesor de 0.4 [mm] y ancho de 15.88 [mm].

#### Cuerda

Es el elemento que cruza de manera transversal a la espina. Esta posee la forma del perfil aerodinámico deseado. Su masa también ayuda a mantener la forma de arco de la vela. Corresponde a la sección más alejada del eje de giro durante la operación del dispositivo.

De igual forma se optó por seguir la recomendación del autor al utilizar fleje de acero doblado a la mitad de tal manera que se generará con este mismo una geometría similar a la de un perfil aerodinámico simétrico.

#### Vela

Es el elemento tensado con la estructura formada por la cuerda y la espina. Este debe ser ligero, impermeable, mostrar poca resistencia a la flexión y alta resistencia a esfuerzos de tensión y cortantes. En este caso se optó por utilizar tela repelente usada comúnmente en los paraguas. El ala se diseñó como una especie de funda que mantiene unida a la espina con la cuerda.

#### Dimensiones

Ya elegidos los materiales sólo quedaron por determinarse las longitudes  $c$  y  $l$  mostradas en la figura. Para elegir la relación entre esas distancias se realizó inicialmente un promedio de la razón  $l/c$  de medidas de la vela en Aeroflexor de videos en internet que muestran al dispositivo en funcionamiento, obteniendo la siguiente tabla.

Tabla 4.2.1 Relación de longitudes “ $c$ ” y “ $l$ ” para el ala del Aeroflexor.

| <b><math>l_1/c_1</math></b> | <b><math>l_2/c_2</math></b> | <b><math>l_3/c_3</math></b> | <b><math>l_4/c_4</math></b> | <b><math>l_5/c_5</math></b> |
|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 5.33                        | 10.2                        | 7.44                        | 4.625                       | 5.02                        |

Debido a que hubo longitudes de cuerda bastante distintas entre sí, se decidió realizar la siguiente prueba:

Se construyeron dos alas; una de ellas con una longitud  $c$  más grande que la otra. En este caso se utilizó papel celofán para el material de la vela y se unió a la espina y a la cuerda con cinta adhesiva, reforzando las secciones que envuelven el perfil ya que registran mayores esfuerzos cortantes y el material comienza a rasgarse.

Tabla 4.2.2 Dimensiones de las alas probadas para el Aeroflexor.

| <b>Ala</b> | <b><math>c</math> [mm]</b> | <b><math>l</math> [mm]</b> |
|------------|----------------------------|----------------------------|
| Pequeña    | 75.00                      | 460.0                      |
| Grande     | 140.0                      | 460.0                      |

Se colocaron dentro del túnel de viento con el arreglo experimental mostrado a continuación:

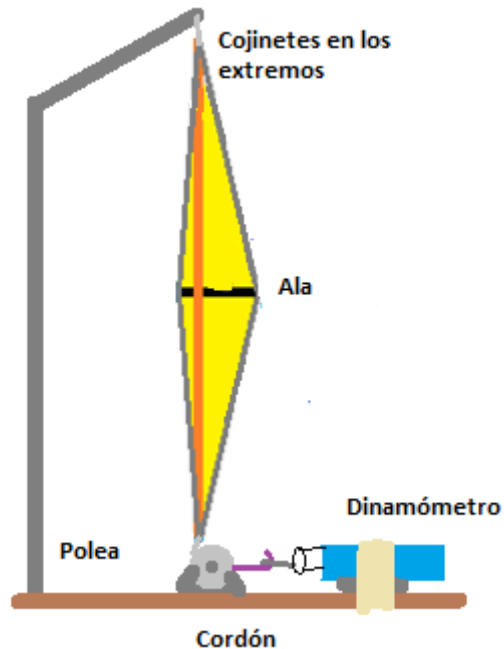


Fig. 4.2.2 Componentes del arreglo Aeroflexor acoplado a un dinamómetro.

Descripción de lo observado:

Recién comenzó a fluir el viento, la vela se posicionó de tal manera que el borde de ataque fue el principal contacto de la cuerda con la corriente. Se registra inicialmente una fuerza constante generada por la transmisión de la fuerza de sustentación del perfil a la vela. Hasta que el sistema logra entrar en desequilibrio este comienza a girar permitiendo observar una fuerza de salida semejante a una función senoidal.

Se sometió cada vela a diferentes velocidades de aire, en un rango de 3 a 10 [m/s]. Para cada velocidad se midió la fuerza máxima con el dinamómetro y la velocidad de rotación con ayuda del estroboscopio.

Elección de los cojinetes

Estos deberán de resistir como mínimo una fuerza longitudinal mayor a 2.7 [N] la cual fue la fuerza máxima registrada con una velocidad de 9.01 [m/s], deberán de ser ligeros y ocupar poco espacio. Debido a lo anterior se decidió ocupar cojinetes giratorios tipo pesca para trabajo pesado como el que se muestra en la Fig. 4.2.3.

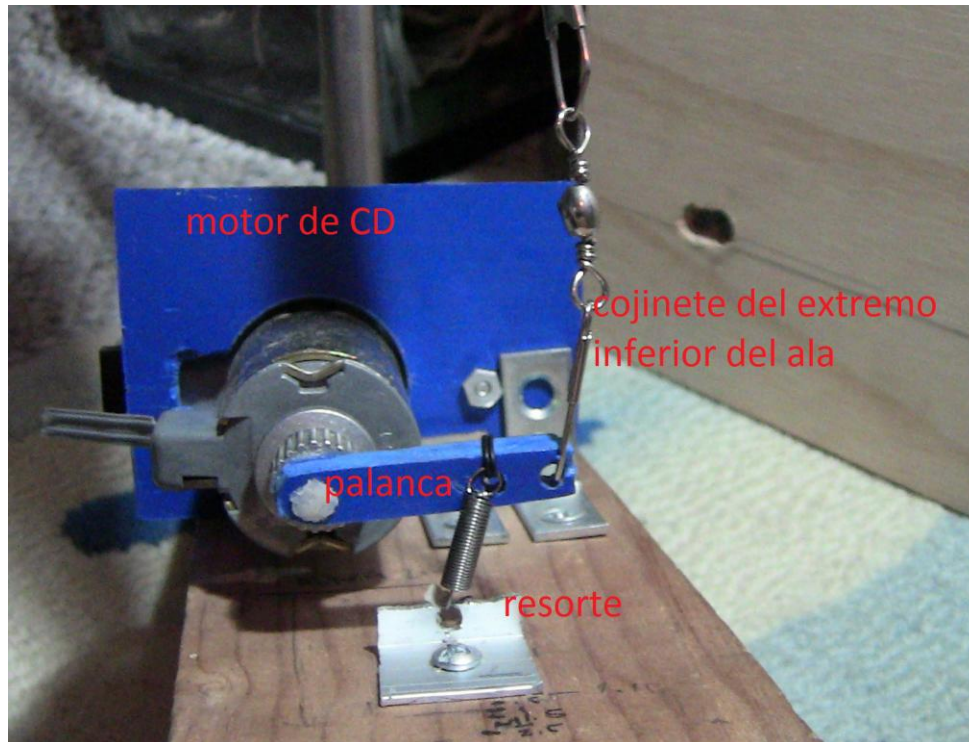


Fig. 4.2.3. Componentes del arreglo Aeroflexor acoplado a un motor eléctrico como generador.

#### Elección del mecanismo retroactivo

Por disposiciones de espacio se prefirió utilizar un resorte de tensión como mecanismo retroactivo. Debido a los elementos a los cuales se acopla el resorte, éste está restringido a una elongación máxima de 40 [mm]. Para obtener un valor aproximado de constante elástica del resorte se analizó el punto en dónde se registró la fuerza máxima con el ala del Aeroflexor que gira en sentido anti horario. El sistema que se va a analizar se presenta en la Fig. 4.2.3 para un mejor entendimiento del diagrama de cuerpo libre que se muestra posteriormente, en la Fig. 4.2.4.

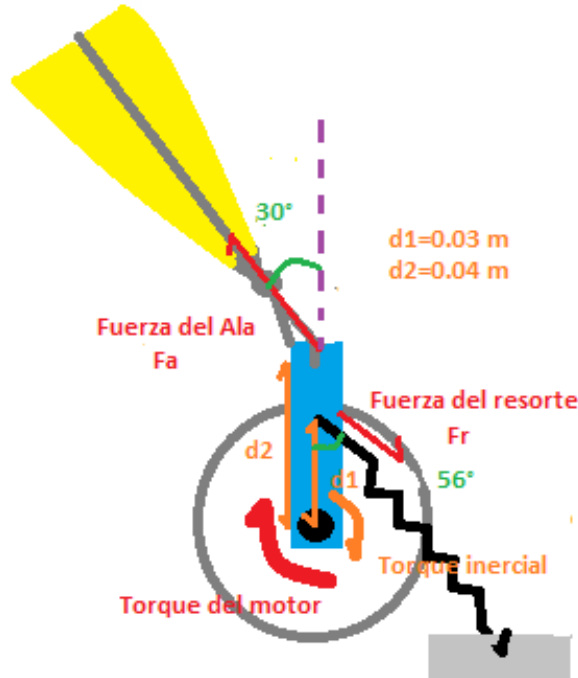


Fig. 4.2.4 Diagrama de fuerzas presentes en el Aeroflexor.

Despreciando el torque inercial debido a que la masa es muy pequeña y el torque del motor ya que la resistencia que ofrece el motor de corriente directa es mínima, la suma de momentos en ese punto queda expresada por:

$$d_2 F_a \sin 30^\circ = d_1 F_r \sin 56^\circ \quad (4.2.1)$$

Si se piensa alcanzar el punto máximo con una fuerza en el ala de 1.4 [N], equivalente a someterlo a viento con velocidad de 5.13 [m/s] entonces la fuerza en el resorte deberá de ser de:

$$F_r = \frac{d_2 F_a \sin 30^\circ}{d_1 \sin 56^\circ} = 1.13 \text{ [N]} \quad (4.2.2)$$

por lo que aplicando la ley de Hooke la constante del resorte deberá de estar alrededor de:

$$k = \frac{F_r}{0.04} = 28.25 \left[ \frac{\text{N}}{\text{m}} \right] \quad (4.2.3)$$

Sin embargo de manera comercial sólo se logró obtener un resorte con una constante elástica de \$k = 200\$, por lo que la máxima deformación que encontrará con esa velocidad de viento es de alrededor de 5 [mm]. Habrá que observar los resultados de manera experimental ya que un resorte de mayor constante elástica almacena una mayor cantidad

de energía y la libera a una velocidad mayor por lo que podría ocasionar que se lograra un mayor desplazamiento angular del eje del motor de CD considerando la velocidad de giro del ala.

#### Elección del generador

Como generador se decidió utilizar un motor de CD acoplado al brazo de palanca descrito anteriormente buscando que este tuviera un torque casi despreciable para que la mayor cantidad de energía la almacenara el resorte y contribuyera al movimiento.

#### Diseño de las bases del Aeroflexor

##### Componentes incluidos en ambas bases

Rectángulo de madera de 470 por 75 [mm] y 1 [in] de grosor. A ésta se le realizaron tres perforaciones para poderla acoplar a la bases genéricas que se ajustarán en el túnel de viento.

Tubo de acero calibre 18, diámetro externo de 1 [in] y 750 [mm] de longitud, doblado a 60° a la altura de 500 [mm]. Este fue soldado a un ángulo de acero de 50.8 [mm] y perforado para unirlo por dos pijas al rectángulo de madera. En el extremo superior se le realizó una perforación muy próxima al fin del tubo, de tal manera que en este se pudiera colgar el cojinete superior de la vela.

##### Base del Aeroflexor con generador

Una barra de 40 [mm] de longitud por 8 [mm] de ancho conformada por PVC espumado de 6 [mm] de espesor y con tres perforaciones a 3 [mm], 30 [mm] y 40 [mm]. En la segunda se encuentra el resorte y en la tercera el cojinete del extremo inferior de la vela del Aeroflexor. Esta barra funciona como brazo de palanca y se unió al eje del motor de CD por medio del primer agujero, éste sujeta a presión al eje. Debido a imperfecciones de manufactura se tuvo que reforzar con una mezcla de cianoacrilato (Kola Loka®) y bicarbonato de sodio.

El motor de CD se unió al rectángulo de madera de tal manera que el agujero de la palanca dónde se sujeta el cojinete del ala quedara lo más alineado posible al cojinete superior. Para su adecuada fijación se perforó una tabla de PVC espumado del tamaño del diámetro del motor y posteriormente una parte del motor se atornilló a ésta. La placa se fijó por medio de dos ángulos al rectángulo de madera y por último se restringió el cabeceo de la parte posterior del motor con una lámina en forma de "Z".

##### Base del Aeroflexor sin generador

Polea formada por dos secciones de ángulo atornilladas a la tabla rectangular de tal manera que los dos cojinetes queden alineados, una cuenta de pulsera cilíndrica que funge como rodamiento, un tornillo que ocupa la función de eje y su respectiva tuerca de ajuste.



A continuación se muestran los factores estudiados para la determinación del tamaño del ala empleada en el Aeroflexor.

Tabla 4.2.3 Factores estudiados para determinar las dimensiones del Aeroflexor.

| Ala pequeña                |                 |          | Ala grande                 |                 |          |
|----------------------------|-----------------|----------|----------------------------|-----------------|----------|
| Velocidad del viento [m/s] | Frecuencia [Hz] | Fmax [N] | Velocidad del viento [m/s] | Frecuencia [Hz] | Fmax [N] |
| 3.16                       | 2.37            | 0.1      | 3.28                       | 2.60            | 0.9      |
| 4.14                       | 2.87            | 0.4      | 4.21                       | 3.18            | 1.0      |
| 5.19                       | 3.25            | 0.6      | 5.13                       | 3.64            | 1.4      |
| 6.10                       | 3.75            | 0.7      | 6.20                       | 4.02            | 1.7      |
| 7.12                       | 4.06            | 0.7      | 7.15                       | 4.52            | 1.9      |
| 8.80                       | 4.07            | 0.7      | 8.22                       | 4.93            | 2.6      |
| 9.01                       | 4.51            | 0.8      | 9.01                       | 5.20            | 2.7      |

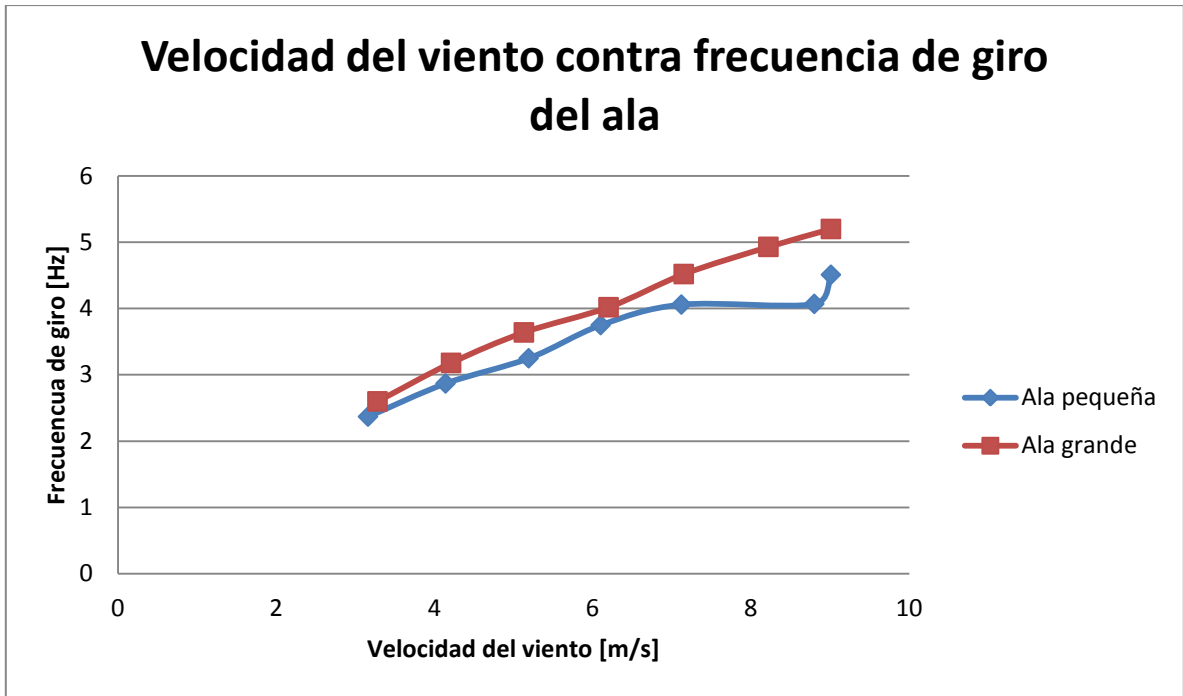


Fig. 4.2.5  
Frecuencia de giro contra velocidad del viento en el Aeroflexor.

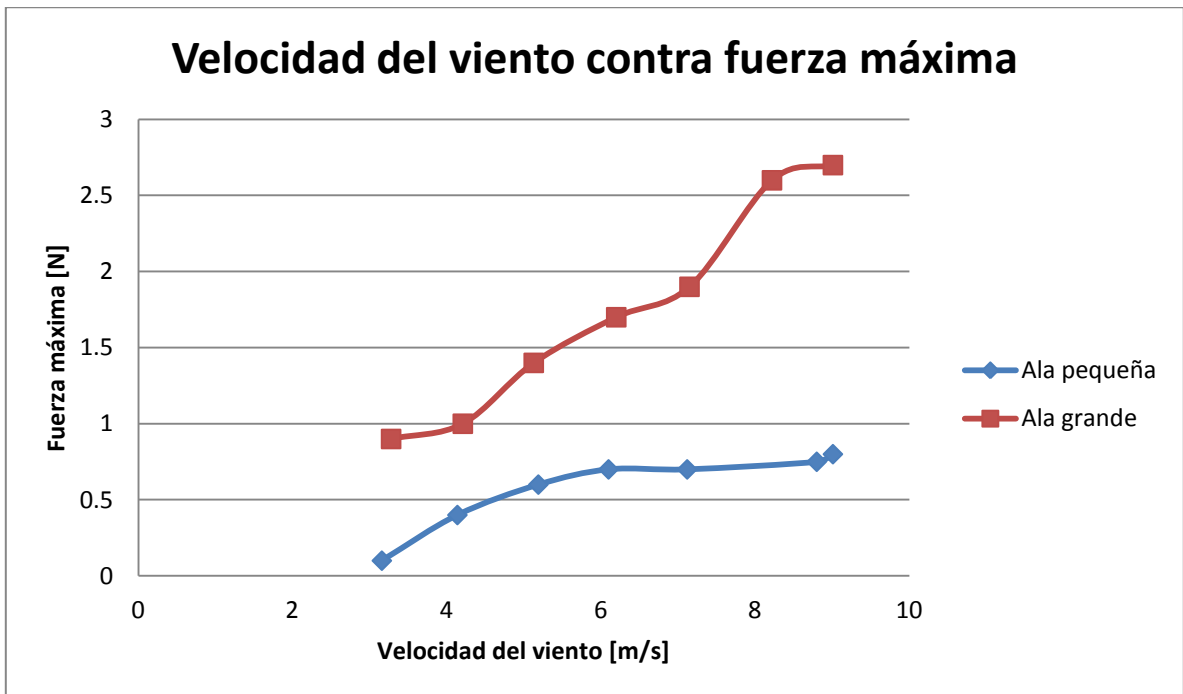


Fig. 4.2.6  
Fuerza contra velocidad del viento en el Aeroflexor.

En las gráficas se observa que al aumentar la longitud de “c”, se obtuvieron mayores velocidades de rotación y fuerza máxima. Debido a lo anterior se optó por utilizar el ala grande a costa de una mayor cantidad de material y pensando que la base deberá resistir cargas mayores.

### 4.3 Dispositivos con materiales cerámicos piezoeléctricos

#### Cálculos Teóricos

Antes de iniciar la etapa experimental se desarrollaron los siguientes cálculos de forma que se conociera el funcionamiento del bimorph utilizado, así como el comportamiento que éste tendría al modificar los brazos de palanca y las geometrías colocadas en el extremo libre del mismo.

El modelado de un arreglo de piezoeléctrico colocado asemejando una viga empotrada [10] suele hacerse a través de diversos modelos, el más utilizado es el denominado “lumped-parameter” que significa que presenta una solución de parámetros concentrados [11]. Generalmente para este modelo se considera un único grado de libertad mecánico. Esto es bastante conveniente debido a que la parte eléctrica también tiene una solución de parámetros concentrados, por lo que es sencillo encontrarlos para la parte eléctrica y para la parte mecánica, de forma que se pueda obtener una relación que exprese la transducción de energía mecánica a eléctrica [4].

Este modelo únicamente da una aproximación a grandes rasgos del funcionamiento físico del arreglo, pues le falta considerar aspectos como el modo dinámico de las formas de la viga, la distribución de la deformación del piezoeléctrico y los efectos que esto tiene en la respuesta eléctrica, así como el hecho de que la excitación externa no siempre puede considerarse de tipo armónica, pues generalmente es no lineal [5], [12].

En nuestro trabajo no se desarrolló este procedimiento teórico debido a que hubiéramos tenido que considerar muchos parámetros como despreciables y otros los tendríamos que haber supuesto debido a la imposibilidad de medirlos experimentalmente en el túnel de viento y a que no los podemos conocer de otra manera. Entre estos podemos mencionar la amortiguación viscosa del aire o la frecuencia de funcionamiento del arreglo, esto significa que el modelado no hubiera arrojado resultados confiables para fines comparativos. Por estas razones se centró el trabajo en la parte experimental, al menos en lo referente al comportamiento del bimorph colocado en cantiléver.

Considerando lo anterior, los cálculos que se realizaron se enfocaron en conocer el funcionamiento del piezoeléctrico y cómo podría optimizarse dicho funcionamiento al menos en la teoría, de forma que se pudieran comparar posteriormente las propuestas en el túnel de viento y obtener así una forma de comparación.

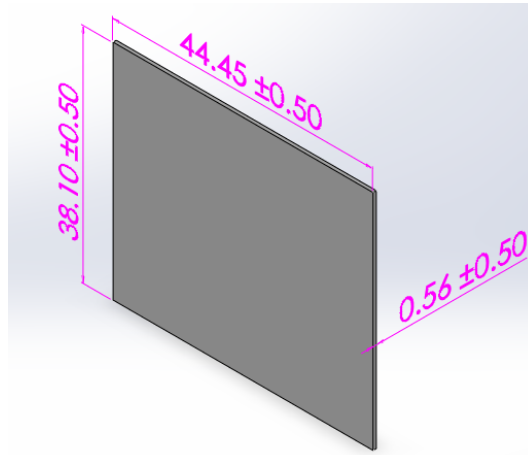


Fig. 4.3.1 Dimensiones del Bimorph PZT 5A1 utilizado. (Valores en milímetros).

Las características físicas del bimorph utilizado son las siguientes:

Tabla 4.3.1 Características del piezoeléctrico PZT 5A1 utilizado.

| Propiedad | Valor   | Unidad               |
|-----------|---------|----------------------|
| Largo     | 44.45   | [mm]                 |
| Ancho     | 38.10   | [mm]                 |
| Espesor   | 0.559   | [mm]                 |
| Densidad  | 7750    | [Kg/m <sup>3</sup> ] |
| Volumen   | 946.692 | [mm <sup>3</sup> ]   |
| Masa      | 7.337   | [g]                  |

Tomando en consideración solamente al bimorph, se tendrían los siguientes resultados para sus características de funcionamiento [31]:

Frecuencia natural:

$$f_r = \frac{N_t}{L} = \frac{1940 [Hz \cdot m]}{44.45 \times 10^{-3} [m]} = 43.65 [KHz] \quad (4.3.1)$$

Capacitancia (en función del esfuerzo presente en el piezoeléctrico en estado estático, es decir, no esfuerzos aplicados cíclicamente):

$$C = \frac{K_{33}^T * \epsilon_0 * \pi * L * W}{thk} = \frac{0.67^T * 8.85 \times 10^{-12} \left[ \frac{F}{m} \right] * 44.45 \times 10^{-3} [m] * 38.1 \times 10^{-3} [m]}{0.559 \times 10^{-3} [m]} \\ = 0.67^T * 26.82 \times 10^{-12} [F] \quad (4.3.2)$$

Voltaje (aplicado en estado estático no cíclicamente):

$$V = \frac{g_{31} * F}{L} = \frac{-11 \times 10^{-3} \left[ \frac{Vm}{N} \right] * 0.07196 [N]}{44.45 \times 10^{-3} [m]} = -0.01781 [V] \\ = -17.81 [mV] \quad (4.3.3)$$

Considerando únicamente el peso propio del bimorph (0.07196 [N]) y las dimensiones de éste, al realizar los cálculos anteriores queda de manifiesto que un arreglo de únicamente el bimorph en cantiléver no será muy eficiente, pues requeriría de una frecuencia muy alta para funcionar cercano a su frecuencia natural, además de que la fuerza que se aplicaría solamente dependería del peso del mismo y de la fuerza con la que la corriente de aire incidente lo deformara. Esto significaría que el piezoeléctrico generara una diferencia de potencial muy baja y prácticamente imposible de aprovechar. Aunque el valor de -17.81 [mV] no considera la fuerza que el aire estaría aplicando para deformarlo.

#### Geometrías de Prueba

Considerando lo anterior queda claro porque se decidió emplear una serie de geometrías ancladas en el extremo libre del piezoeléctrico, de forma que se comportara como una viga empotrada con una masa en el extremo, la cual no solamente ayuda a que la fuerza aplicada para deformar el material sea mayor, si no que la geometría permite que la incidencia del aire sobre el arreglo provoque una mayor fuerza de deformación. De esta manera se pretendió obtener una diferencia de potencial y una cantidad de energía eléctrica más aprovechable.

#### 4.3.1 Piezo-Leaf

##### Construcción del prototipo

Con la intención de reducir el impacto visual del arreglo, se busca que aparente ser un árbol o al menos tenga las mismas dimensiones y una apariencia lo más natural posible, de forma que no se altere el paisaje, tal como ocurre actualmente con las turbinas de eje horizontal principalmente, y en menor medida las de eje vertical. Es por esta razón que la estructura en la que se colocan los arreglos de piezoeléctricos, brazo de palanca y geometrías triangulares, se pretende que sea lo más sencilla posible y con geometrías que asemejen “ramas” en las que se encuentren atornillados los soportes en los que se empotran los bimorphs. Si bien en las pruebas en el túnel de viento estas estructuras no se realizaron por limitaciones de espacio, disponibilidad de materiales piezoeléctricos y alcances del trabajo, la idea final de implementación es que el dispositivo tenga la apariencia antes mencionada y se reduzca el impacto ambiental y visual en las zonas en las que se instale.

Tomando como base lo anterior se construyó una estructura sencilla de metal que representa a una de las “ramas” que podría tener el dispositivo. Esta estructura es la misma empleada para las pruebas del dispositivo denominado “Vibro-Wind” y que se encuentra descrita posteriormente en la sección del banco de pruebas. Ver Capítulo IV Sección 4.1 para mayor información.

La forma de fijar el piezoeléctrico a la estructura metálica, es colocando su eje de polarización paralelo al piso del túnel de viento, por lo que se emplea una pestaña que se

fija a la estructura metálica y permite también que la mayor superficie del piezoeléctrico, sea paralela a dicha estructura, es decir que el eje de polarización es perpendicular al arreglo antes mencionado.

Para poder atornillar el bimorph con el piezoeléctrico a la pestaña y posteriormente el brazo de palanca a éste, se tuvo que barrenar en sus extremos, teniendo cuidado de que no se tuviera continuidad con los tornillos, la pestaña o el brazo de palanca, lo que significaría que no se generaría una diferencia de potencial ni una corriente eléctrica.

Debido a que el bimorph utilizado tiene una longitud menor a la que se necesita para obtener resultados satisfactorios sin necesidad de incluir un brazo de palanca, se construyeron seis diferentes componentes que fungen como brazos de palanca de diferente longitud, de forma que se aumente la fuerza mecánica aplicada sobre el bimorph y entonces se pueda tener una transducción a energía eléctrica más eficiente.

Asimismo se probaron tres diferentes tamaños de geometría triangular, de forma que se pudiera conocer cómo afecta el tamaño de ésta en la obtención de la energía eléctrica. Estos componentes, tanto las “hojas” como los brazos de palanca, están sujetos a las medidas máximas que nos permite tener el túnel de viento sin que la capa límite encontrada cerca de las caras internas del mismo afecte la medición de las presiones y velocidades del viento.

#### Descripción detallada de los componentes utilizados

##### Brazo de Palanca

El elemento encargado de deformar con mayor fuerza al bimorph y de esta manera conseguir una mayor flexión, que a su vez significa una mayor diferencia de potencial, una corriente eléctrica de mayor magnitud y un funcionamiento más aprovechable. Se tienen diferentes tamaños de brazo de palanca y diferentes geometrías, con el fin de analizar experimentalmente cual es la más adecuada para cada rango de funcionamiento. Están fabricados en Alucobond®. Se puede observar este componente en la Fig. 4.3.2.

##### Geometría triangular colocada en la punta

Este elemento también puede ser modificado en cuanto a su tamaño, es la geometría en forma de hoja que le da el nombre al arreglo en general. Se ubica en el extremo del arreglo que se pretende sea sobre el que incida la corriente de aire. Esta fabricada de PVC espumado. Este componente se encuentra referenciado en la Fig. 4.3.2.

##### Elementos de fijación

Se aprovecha la estructura metálica diseñada para probar en el túnel de viento al Vibro-Wind y a este dispositivo, por lo que el brazo de palanca seleccionado y la geometría de la punta seleccionada se unen al piezoeléctrico mediante tornillos y tuercas de 1/8 de pulgada, a las cuales se les coloca un material plástico aislante para evitar un circuito corto en el piezoeléctrico. Luego todo el arreglo se coloca en las bases metálicas diseñadas para sujetar en la estructura al dispositivo y en esta parte también se une mediante tornillos y

tuercas de 1/8 de pulgada, teniendo cuidado de aislar bien los metales del piezoeléctrico PZT 5A1. Todo lo anterior se puede observar en la Fig. 4.3.2.

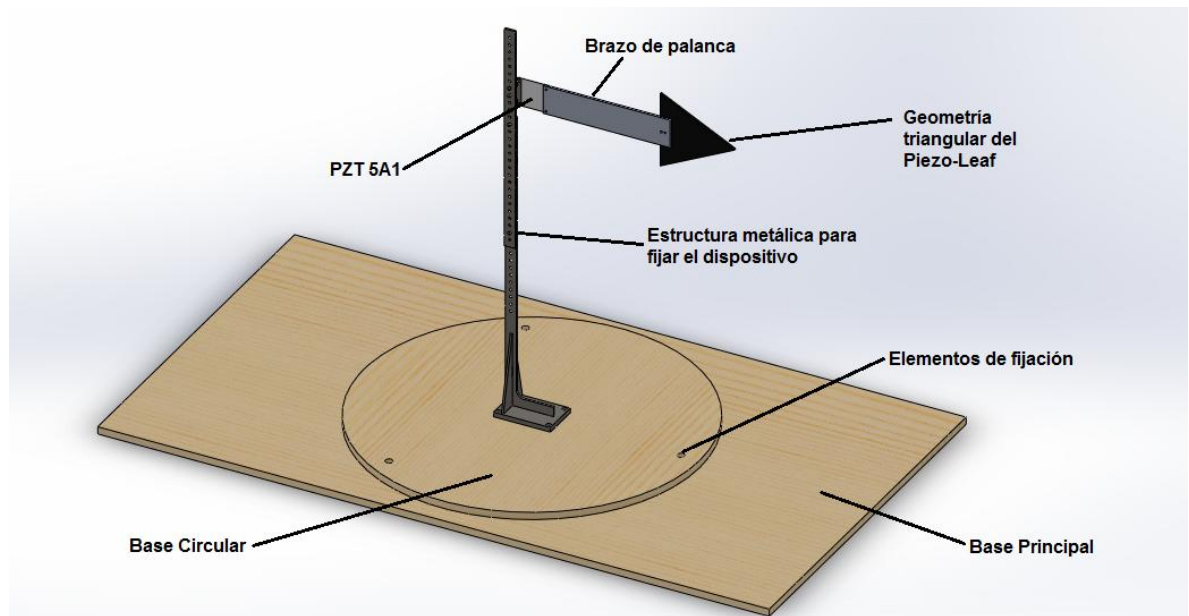


Fig. 4.3.2 Diseño CAD del Piezo-Leaf utilizado en las pruebas.

Las geometrías elegidas consisten básicamente en dos diferentes tipos de brazos de palanca, uno en forma rectangular del ancho del piezoeléctrico (38.1 [mm]), mientras que la otra es más delgada en su parte central a fin de que el momento de inercia sea menor y entonces el recorrido y por consiguiente la deformación provocada, sean mayores.

El otro elemento del arreglo que se modificó para mejorar el rendimiento del Piezo-Leaf fue la forma triangular semeñando una hoja, pues a este elemento también se le modificó su tamaño con el fin de que generara un mayor arrastre y permitiera inducir una mayor flexión en el bimorph.

Lo que se pretendió conocer fue la combinación de brazo de palanca y forma triangular más eficientes, de manera que las diferencias de peso pudieran ser compensadas con un momento de inercia menor, o los momentos de inercia elevados se pudieran contrarrestar con diseños cuyo arrastre fuera mayor.

Las dos geometrías de brazo de palanca utilizadas fueron las siguientes:

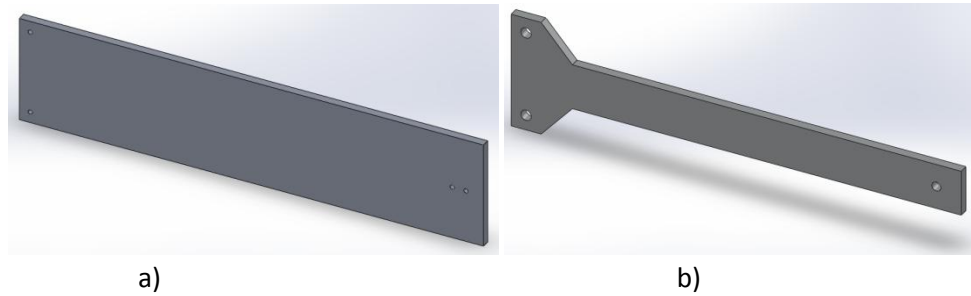


Fig. 4.3.3 a) Geometría de brazo de palanca rectangular y b) geometría de brazo de palanca delgado.

Los datos de las piezas que se acoplaron al bimorph son los siguientes:

Tabla 4.3.1.1

Brazo de Palanca Rectangular hecho de Alucobond® 100 [mm]:

| Propiedad          | Valor   | Unidad               |
|--------------------|---------|----------------------|
| Longitud           | 100     | [mm]                 |
| Ancho              | 38.1    | [mm]                 |
| Espesor            | 3       | [mm]                 |
| Volumen            | 11430   | [mm <sup>3</sup> ]   |
| Densidad           | 1500    | [Kg/m <sup>3</sup> ] |
| Masa               | 17.15   | [g]                  |
| Momento de Inercia | 2073.99 | [g*mm <sup>2</sup> ] |

Tabla 4.3.1.2

Brazo de Palanca Rectangular hecho de Alucobond® 150 [mm]:

| Propiedad          | Valor   | Unidad               |
|--------------------|---------|----------------------|
| Longitud           | 150     | [mm]                 |
| Ancho              | 38.1    | [mm]                 |
| Espesor            | 3       | [mm]                 |
| Volumen            | 17145   | [mm <sup>3</sup> ]   |
| Densidad           | 1500    | [Kg/m <sup>3</sup> ] |
| Masa               | 25.72   | [g]                  |
| Momento de Inercia | 3111.28 | [g*mm <sup>2</sup> ] |

Tabla 4.3.1.3

Brazo de Palanca Rectangular hecho de Alucobond® 170 [mm]:

| Propiedad | Valor | Unidad |
|-----------|-------|--------|
| Longitud  | 170   | [mm]   |
| Ancho     | 38.1  | [mm]   |



|                           |         |                      |
|---------------------------|---------|----------------------|
| <b>Espesor</b>            | 3       | [mm]                 |
| <b>Volumen</b>            | 19431   | [mm <sup>3</sup> ]   |
| <b>Densidad</b>           | 1500    | [Kg/m <sup>3</sup> ] |
| <b>Masa</b>               | 29.15   | [g]                  |
| <b>Momento de Inercia</b> | 3525.78 | [g*mm <sup>2</sup> ] |

Tabla 4.3.1.4

Brazo de Palanca Delgado hecho de Alucobond® 100 [mm]:

| <b>Propiedad</b>          | <b>Valor</b> | <b>Unidad</b>        |
|---------------------------|--------------|----------------------|
| <b>Longitud</b>           | 100          | [mm]                 |
| <b>Ancho</b>              | 38.1         | [mm]                 |
| <b>Espesor</b>            | 3            | [mm]                 |
| <b>Volumen</b>            | 5193         | [mm <sup>3</sup> ]   |
| <b>Densidad</b>           | 1500         | [Kg/m <sup>3</sup> ] |
| <b>Masa</b>               | 7.79         | [g]                  |
| <b>Momento de Inercia</b> | 321.31       | [g*mm <sup>2</sup> ] |

Tabla 4.3.1.5

Brazo de Palanca Delgado hecho de Alucobond® 150 [mm]:

| <b>Propiedad</b>          | <b>Valor</b> | <b>Unidad</b>        |
|---------------------------|--------------|----------------------|
| <b>Longitud</b>           | 150          | [mm]                 |
| <b>Ancho</b>              | 38.1         | [mm]                 |
| <b>Espesor</b>            | 3            | [mm]                 |
| <b>Volumen</b>            | 7443         | [mm <sup>3</sup> ]   |
| <b>Densidad</b>           | 1500         | [Kg/m <sup>3</sup> ] |
| <b>Masa</b>               | 11.17        | [g]                  |
| <b>Momento de Inercia</b> | 384.59       | [g*mm <sup>2</sup> ] |

Tabla 4.3.1.6

Brazo de Palanca Delgado hecho de Alucobond® 170 [mm]:

| <b>Propiedad</b>          | <b>Valor</b> | <b>Unidad</b>        |
|---------------------------|--------------|----------------------|
| <b>Longitud</b>           | 170          | [mm]                 |
| <b>Ancho</b>              | 38.1         | [mm]                 |
| <b>Espesor</b>            | 3            | [mm]                 |
| <b>Volumen</b>            | 8343         | [mm <sup>3</sup> ]   |
| <b>Densidad</b>           | 1500         | [Kg/m <sup>3</sup> ] |
| <b>Masa</b>               | 12.52        | [g]                  |
| <b>Momento de Inercia</b> | 409.90       | [g*mm <sup>2</sup> ] |

Las geometrías triangulares utilizadas fueron las siguientes, estos triángulos no son de tipo equilátero, si no que su base y su altura tienen el mismo valor de distancia, ya sea 50 [mm], 75 [mm] o 100 [mm] respectivamente. La geometría se muestra en la Fig. 4.3.4 a continuación.

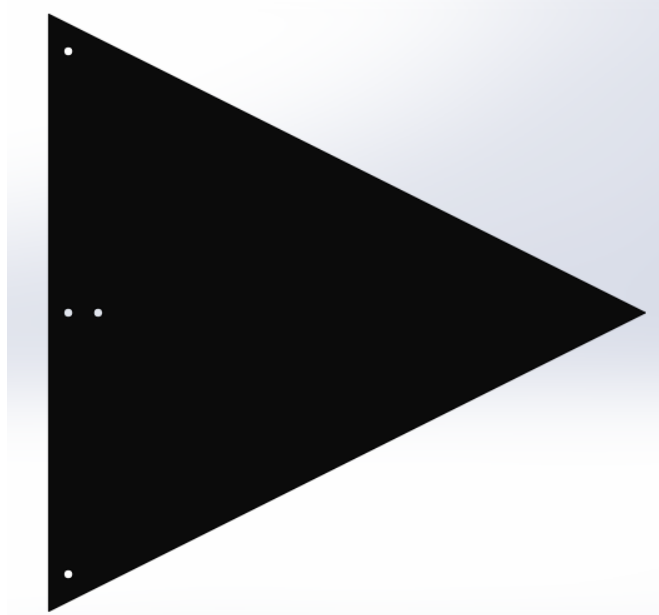


Fig. 4.3.4 Geometría triangular empleada en la punta del dispositivo Piezo-Leaf.

Tabla 4.3.1.7

Triángulo 50 [mm] hecho de PVC espumado:

| Propiedad          | Valor  | Unidad               |
|--------------------|--------|----------------------|
| Longitud           | 50     | [mm]                 |
| Ancho              | 50     | [mm]                 |
| Espesor            | 3      | [mm]                 |
| Volumen            | 3750   | [mm <sup>3</sup> ]   |
| Densidad           | 700    | [Kg/m <sup>3</sup> ] |
| Masa               | 2.625  | [g]                  |
| Momento de Inercia | 182.29 | [g*mm <sup>2</sup> ] |

Tabla 4.3.1.8

Triángulo 75 [mm] hecho de PVC espumado:

| Propiedad          | Valor  | Unidad               |
|--------------------|--------|----------------------|
| Longitud           | 75     | [mm]                 |
| Ancho              | 75     | [mm]                 |
| Espesor            | 3      | [mm]                 |
| Volumen            | 8437.5 | [mm <sup>3</sup> ]   |
| Densidad           | 700    | [Kg/m <sup>3</sup> ] |
| Masa               | 5.91   | [g]                  |
| Momento de Inercia | 923.44 | [g*mm <sup>2</sup> ] |

Tabla 4.3.1.9

Triángulo 100 [mm] hecho de PVC espumado:

| Propiedad          | Valor   | Unidad               |
|--------------------|---------|----------------------|
| Longitud           | 100     | [mm]                 |
| Ancho              | 100     | [mm]                 |
| Espesor            | 3       | [mm]                 |
| Volumen            | 15000   | [mm <sup>3</sup> ]   |
| Densidad           | 700     | [Kg/m <sup>3</sup> ] |
| Masa               | 10.5    | [g]                  |
| Momento de Inercia | 2916.67 | [g*mm <sup>2</sup> ] |

Debido a que se realizaron pruebas con diferentes combinaciones, y a que se consideró como una única pieza al arreglo de bimorph piezoeléctrico con las correspondientes geometrías acopladas a su extremo libre, se debió de emplear el Teorema de los Ejes Paralelos [1] para trasladar los ejes centroidales hacia el extremo libre del piezoeléctrico de manera que se puedan calcular otros parámetros. En la siguiente Tabla 4.3.1.10. se muestran los valores de momentos de inercia sobre el eje ubicado en el extremo libre del piezoeléctrico.<sup>3</sup>

<sup>3</sup> Se consideró una aportación en el eje y despreciable para el valor de la coordenada del centro de masa por parte del bimorph, ya que el espesor de 0.559 [mm] puede ser despreciado para el cálculo de los momentos de inercia trasladados al extremo libre del mismo.

Tabla 4.3.1.10

Combinaciones de arreglos probados para el Piezo-Leaf.

| Combinación   | Masa [g] | Peso [N] | Momento de Inercia [g mm <sup>2</sup> ] |
|---|----------|----------|---|
| Brazo palanca rectangular 100 [mm] – Triángulo 50 [mm]  | 27.112   | 0.2660   | 56365.12                                |
| Brazo palanca rectangular 100 [mm] – Triángulo 75 [mm]  | 30.397   | 0.2982   | 115734.85                               |
| Brazo palanca rectangular 100 [mm] – Triángulo 100 [mm] | 34.987   | 0.3432   | 163779.86                               |
| Brazo palanca rectangular 150 [mm] – Triángulo 50 [mm]  | 35.682   | 0.3500   | 175148.14                               |
| Brazo palanca rectangular 150 [mm] – Triángulo 75 [mm]  | 38.967   | 0.3823   | 295876.69                               |
| Brazo palanca rectangular 150 [mm] – Triángulo 100 [mm] | 43.557   | 0.4273   | 390557.81                               |
| Brazo palanca rectangular 170 [mm] – Triángulo 50 [mm]  | 39.112   | 0.3837   | 249993.06                               |
| Brazo palanca rectangular 170 [mm] – Triángulo 75 [mm]  | 42.397   | 0.4159   | 401212.68                               |
| Brazo palanca rectangular 170 [mm] – Triángulo 100 [mm] | 46.987   | 0.4609   | 519163.93                               |
| Brazo palanca delgado 100 [mm] – Triángulo 50 [mm]      | 17.752   | 0.1741   | 17389.25                                |
| Brazo palanca delgado 100 [mm] – Triángulo 75 [mm]      | 21.037   | 0.2064   | 54074.66                                |
| Brazo palanca delgado 100 [mm] – Triángulo 100 [mm]     | 25.627   | 0.2514   | 115452.49                               |
| Brazo palanca delgado 150 [mm] – Triángulo 50 [mm]      | 21.132   | 0.2073   | 69943.76                                |
| Brazo palanca delgado 150 [mm] – Triángulo 75 [mm]      | 24.417   | 0.2395   | 160935.29                               |

|  |                |        |        |           |
|--|----------------|--------|--------|-----------|
| <b>Brazo delgado 150 [mm] – Triángulo 100 [mm]</b> | <b>palanca</b> | 29.007 | 0.2846 | 298860.01 |
| <b>Brazo delgado 170 [mm] – Triángulo 50 [mm]</b>  | <b>palanca</b> | 22.482 | 0.2205 | 103882.99 |
| <b>Brazo delgado 170 [mm] – Triángulo 75 [mm]</b>  | <b>palanca</b> | 25.767 | 0.2528 | 222975.88 |
| <b>Brazo delgado 170 [mm] – Triángulo 100 [mm]</b> | <b>palanca</b> | 30.357 | 0.2978 | 400188.51 |

Lo que se buscó no fue solamente incrementar la fuerza con la que se flexionara el piezoeléctrico mediante el uso del brazo de palanca, si no que con las diferentes combinaciones de longitudes de brazos de palanca, tipos de brazos de palanca y tamaños de geometrías triangulares, se pudiera obtener una relación entre eficiencia de transducción de la energía con relación al peso en el extremo libre del piezoeléctrico, el tamaño del arreglo y el momento de inercia de la mismo.

Asimismo se trató de reducir la frecuencia óptima de funcionamiento en comparación con la que se tiene solamente si se emplea el PZT 5A1, de forma que en el rango de las velocidades de viento comunes para una ciudad, sea factible que el piezoeléctrico trabaje a una frecuencia cercana a su óptima.

Para ello se calcularon las frecuencias óptimas de los diferentes arreglos [2], tomando en consideración que la rigidez del brazo de palanca y la geometría triangular eran equivalentes a las del piezoeléctrico PZT 5A1, aunque en realidad eran ligeramente mayor en relación con los brazos de palanca hechos de Alucobond® y ligeramente menor la de las geometrías hechas con PVC espumado. De esta forma la constante de frecuencia del piezoeléctrico se utilizó para dichos cálculos.

A su vez se estimó el voltaje que tendría el piezoeléctrico debido a la deformación causada únicamente por el propio peso del arreglo y en estático, con la intención de conocer posteriormente la aportación del aire al voltaje generado. Los resultados se muestran en la Tabla 4.3.1.11.

Tabla 4.3.1.11

Voltajes estáticos y frecuencias óptimas para las combinaciones de arreglos del Piezo-Leaf.

| <b>Configuración</b>   | <b>Voltaje en estático [mV]</b> | <b>Frecuencia óptima [KHz]</b> |
|--|---------------------------------|--------------------------------|
| <b>Piezoeléctrico PZT 5A1</b>                                  | -17.81                          | 43.65                          |
| <b>Brazo palanca rectangular 100 [mm] – Triángulo 50 [mm]</b>  | -65.82                          | 12.04                          |
| <b>Brazo palanca rectangular 100 [mm] – Triángulo 75 [mm]</b>  | -73.79                          | 11.45                          |
| <b>Brazo palanca rectangular 100 [mm] – Triángulo 100 [mm]</b> | -84.94                          | 10.91                          |
| <b>Brazo palanca rectangular 150 [mm] – Triángulo 50 [mm]</b>  | -86.62                          | 9.19                           |
| <b>Brazo palanca rectangular 150 [mm] – Triángulo 75 [mm]</b>  | -94.60                          | 8.84                           |
| <b>Brazo palanca rectangular 150 [mm] – Triángulo 100 [mm]</b> | -105.74                         | 8.52                           |
| <b>Brazo palanca rectangular 170 [mm] – Triángulo 50 [mm]</b>  | -94.95                          | 8.39                           |
| <b>Brazo palanca rectangular 170 [mm] – Triángulo 75 [mm]</b>  | -102.93                         | 8.10                           |
| <b>Brazo palanca rectangular 170 [mm] – Triángulo 100 [mm]</b> | -114.07                         | 7.83                           |
| <b>Brazo palanca delgado 100 [mm] – Triángulo 50 [mm]</b>      | -43.10                          | 12.04                          |
| <b>Brazo palanca delgado 100 [mm] – Triángulo 75 [mm]</b>      | -51.07                          | 11.45                          |
| <b>Brazo palanca delgado 100 [mm] – Triángulo 100 [mm]</b>     | -62.21                          | 10.91                          |
| <b>Brazo palanca delgado 150 [mm] – Triángulo 50 [mm]</b>      | -51.30                          | 9.19                           |
| <b>Brazo palanca delgado 150 [mm] – Triángulo 75 [mm]</b>      | -59.28                          | 8.84                           |
| <b>Brazo palanca delgado 150 [mm] – Triángulo 100 [mm]</b>     | -70.42                          | 8.52                           |
| <b>Brazo palanca delgado 170 [mm] – Triángulo 50 [mm]</b>      | -54.58                          | 8.39                           |
| <b>Brazo palanca delgado 170 [mm] – Triángulo 75 [mm]</b>      | -62.55                          | 8.10                           |

|   |        |      |
|---|--------|------|
| [mm] – Triángulo 75 [mm]                            |        |      |
| Brazo palanca delgado 170 [mm] – Triángulo 100 [mm] | -73.70 | 7.83 |

#### 4.3.2. Giro-Wind

##### Idealización y construcción del prototipo

Se comenzó probando la idea original del funcionamiento del Vibro-Wind realizado en la Universidad de Cornell<sup>4</sup>, sin embargo debido a que el piezoeléctrico que utilizamos era cerámico y el utilizado por dicha universidad era polimérico, y éste último se podía deformar más fácilmente con el efecto de las fuerzas aerodinámicas que el nuestro, también se decidió que se usarían los brazos de palanca empleados en Piezo-Leaf y descritos anteriormente.

Para el diseño del arreglo fijamos las dimensiones de la figura que se posicionó en el cantiléver del brazo, la cual fue un cubo de 50 [mm] por lado, el cual fue hecho de PVC espumado debido a que este material es muy fácil de usar para formar figuras de manera sencilla y no es muy pesado.

Para llegar al arreglo final fue necesario hacer algunas iteraciones en el diseño llevando a cabo algunas pruebas preliminares para conocer el funcionamiento de una forma estimada, en la prueba de la primera configuración (Fig 4.3.2.1) se obtuvieron resultados no satisfactorios. Considerados de esta manera en comparación con pruebas en las cuales deformamos el piezoeléctrico manualmente y que nos permitieron medir un valor de hasta 20 [V] con relativamente poca fuerza aplicada, sin embargo aún con la mejor configuración (a 10 [m/s] y brazo de 170 [mm], siendo esta la que provocaría mayor deformación) los datos obtenidos de voltaje medio apenas alcanzaban el valor de 1 [V] por lo cual se pensó que se podía incrementar al realizar algunos cambios.



Fig. 4.3.2.1. Primera configuración.



Fig. 4.3.2.2. Segunda configuración.

<sup>4</sup> “Creative Machines” es un programa del Departamento de Ingeniería de la Universidad de Cornell, en Ithaca, New York. Los responsables de dicho programa son Francis Moon, Shu-guang Li y Hod Lipson.



Fig. 4.3.2.3. Tercera configuración.



Fig. 4.3.2.4. Cuarta configuración.

Para la segunda configuración (Fig 4.3.2.2) se tomó en cuenta que la disposición de la geometría del piezoeléctrico y el brazo de palanca probado anteriormente no aprovechaban la fuerza de gravedad aplicada en la figura para la deformación, pues viéndolo como una viga tendríamos un momento de inercia mayor que si lo teníamos con la cara de mayor área paralela a la base, por lo cual se decidió crear una base de aluminio que se acoplaba a la estructura principal de acero barrenada. Este componente nos permitió sujetar el piezoeléctrico con los distintos brazos horizontalmente y así aprovechar el peso de la figura para tener una mayor deformación cuando las cargas aerodinámicas se presentaran, dejando que la restitución del piezoeléctrico permitiera regresar a su posición original el arreglo para así tener un mejor desempeño.

Al ensamblarlo nos dimos cuenta que el piezoeléctrico no iba a resistir mucho en cantiléver, pues se flexionaba considerablemente y sus propiedades piezoeléctricas podían verse disminuidas, por lo cual decidimos agregar un resorte que permitiera regresar a la posición original y a su vez limitara la flexión del piezoeléctrico.

Se utilizó un resorte comercial cuya constante resultó ser de  $k=105$  y con la ayuda de un diagrama de cuerpo libre donde estuvieran presentes el peso de la pieza y la fuerza del resorte, suponiendo el piezoeléctrico y el brazo de palanca como un cuerpo rígido con una junta en el extremo pegado a la base, se modificó el ángulo del resorte para obtener la fuerza que mantuviera en equilibrio el arreglo. Con este diagrama de cuerpo libre se calculó con base en el peso de la figura y la fuerza del resorte, un punto en el cual el piezoeléctrico y el brazo se encontrarán con un ángulo positivo con respecto a la horizontal para que cuando se presentaran las cargas, el arreglo tendiera a bajar. Para propiciar esto se agregó un triángulo con una cara cuyo ángulo de ataque favorecía el desplazamiento hacia abajo y el resorte se opusiera a dicho movimiento, de manera que se tuvieran ciclos de deformación.



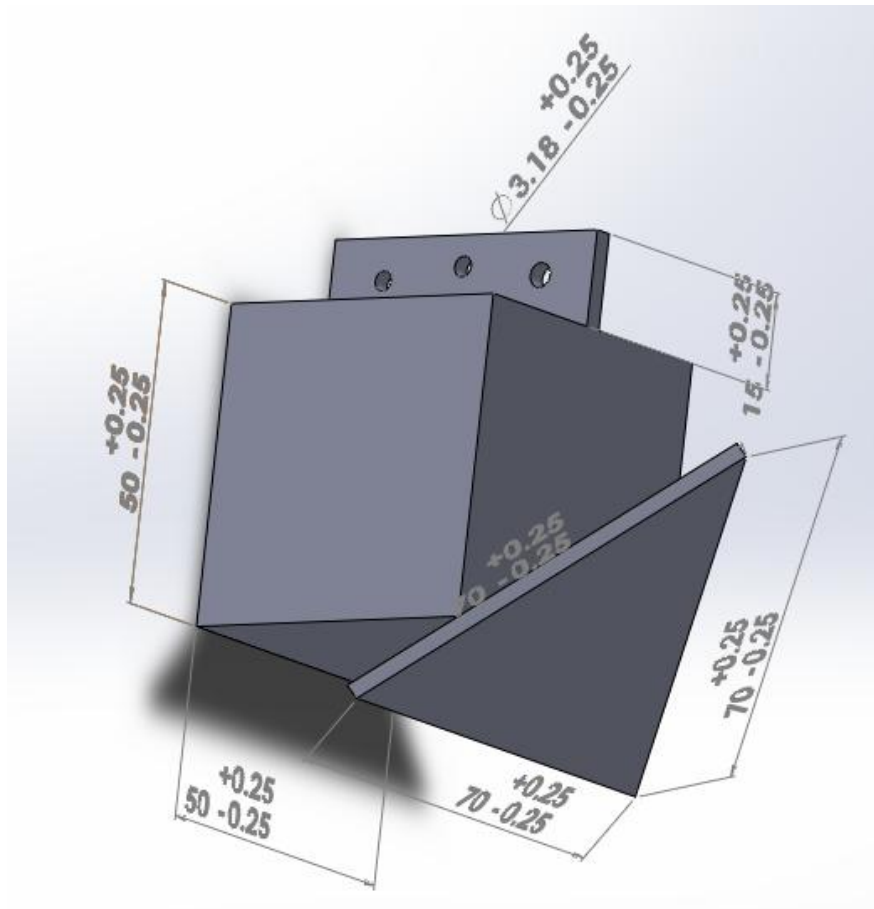


Fig. 4.3.2.5 Diseño de la estructura analizada. (Valores en [mm]).

Se llevaron a cabo las mismas pruebas que en la configuración pasada y de igual manera las condiciones que favorecieron al arreglo eran con velocidad del viento de 10 [m/s] y el brazo de palanca de 170 [mm] pero los valores de voltaje oscilaban entre 0.9 y 2.5 [V]. Esta mejora aún no permitía utilizar todo el potencial del piezoeléctrico empleado por lo cual se decidió probar con una configuración más.

Para la tercera configuración (Fig 4.3.2.3) se exploró la posibilidad de emplear una geometría semejante a un perfil aerodinámico que provocara un movimiento oscilatorio, [3] éste consistía en un perfil octagonal o rectangular con ciertas proporciones las cuales crean los vórtices que dan lugar a esos movimientos oscilatorios.

Se realizó un perfil con las características necesarias y se implementó esperando obtener un comportamiento que generará mejores resultados en el plano eléctrico. Sin embargo no fue así y los resultados fueron peores a los que habíamos observado con la primera configuración. Esto se debió a la manera en que el perfil debía estar sujeto, lo cual restringía el movimiento pero era incompatible con la configuración base de nuestro dispositivo.

Finalmente se descartó esta idea debido a que una de las condiciones de funcionamiento del perfil oscilatorio era estar siempre paralelo al flujo de aire, condición que no siempre se satisface en las ciudades donde se planteaba instalar el dispositivo.

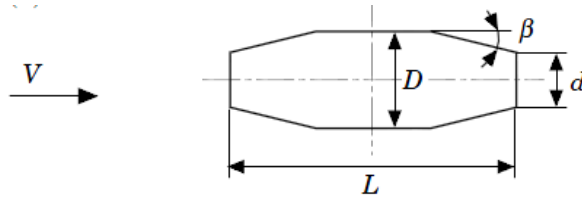


Fig. 4.3.2.6. Perfil oscilatorio probado en la tercera configuración [3]. (Fig. 4.3.2.3).

Donde las proporciones deben de ser:  $\beta=10^\circ$ ,  $d/D=0.6$ ,  $D/L=0.33$

Para la cuarta configuración (Fig 4.3.2.4) se hizo un rediseño de la segunda, que hasta ese momento había sido la más eficiente, utilizando de nuevo el cubo con la geometría triangular, pero se sujetó el arreglo por medio de un cordón a la punta en cantiléver del brazo de palanca. Esto permite poder usar la figura como desestabilizadora y además añadirle un peso por debajo del cubo que sirve para aumentar la inercia una vez que se mueve y éste empieza a girar.

La geometría triangular provoca que el arreglo comience a girar por la asimetría del dispositivo. Se volvió a emplear el resorte, realizándose un proceso iterativo en el cual encontráramos una mayor eficiencia en la vibración del arreglo y así poder tomar la decisión de como fijarlo en la posición más conveniente. La ventaja de este arreglo en comparación con las configuraciones pasadas es que no depende de la dirección con la que el viento ataca ni que el viento que incide en él sea lo más laminar posible. Y debido a que la geometría sujeta del brazo de palanca gira provocando la vibración del arreglo, se decidió cambiar el nombre de nuestro dispositivo a Giro-Wind.

Para el arreglo final se utilizaron los brazos de palanca descritos en las Tablas 4.3.1.4, 4.3.1.5 y 4.3.1.6.

## 5. CAPÍTULO V – Resultados

*Se presentan los resultados obtenidos durante la etapa experimental en el túnel de viento, así como la forma en que las pruebas de eficiencia individual y colectiva de cada uno de los dispositivos se realizaron y que parámetros de funcionamiento se midieron.*

*Los resultados mostrados permiten comprender más fácilmente la manera en que estos dispositivos funcionan, así como observar las diferencias entre ellos.*

### 5.1. Pruebas

#### 5.1.1. Eficiencia Individual

##### 5.1.1.1. Aeroflexor

Para este dispositivo se realizaron dos pruebas distintas, calculándose en ambas el coeficiente de rendimiento o coeficiente de potencia ( $C_p$ ), pero de diferente forma. En la primera prueba se midió la eficiencia de la transducción de la energía cinética del viento en energía eléctrica mediante un motor de corriente directa utilizado como generador y a su vez en esta prueba se midió la energía mecánica de una manera aerodinámica, midiendo la pérdida de potencia en el aire al atravesar el dispositivo. En la segunda prueba la eficiencia se calculó considerándose únicamente la energía mecánica del extremo del ala acoplada a un dinamómetro. Este extremo del ala es el mismo que se acopla al motor empleado como generador antes mencionado.

La prueba de eficiencia eléctrica y los datos recopilados de la energía del viento posterior al dispositivo permitieron calcular el coeficiente de potencia del Aeroflexor de manera meramente aerodinámica. Esta prueba consistió en:

1. Se ajustó el Aeroflexor con el generador en la base principal, aquella con las perforaciones en una circunferencia, y se colocó el arreglo dentro del túnel de viento.  
Se acabó de fijar el tubo tensionándolo con un cordón desde el orificio superior al techo del túnel de viento. Se colocó un potenciómetro de 1 [M $\Omega$ ] como carga y se conectó un multímetro para medir el voltaje alterno de esa terminal.
2. Se reguló la velocidad del viento a 4 [m/s] y se esperó a que el giro del ala se estabilizara.
3. Se registraron datos de velocidad del viento antes y después del dispositivo con ayuda de un tubo de Pitot conectado a un micro manómetro, en la parte anterior al dispositivo se tomó una medición y en la parte posterior se

tomaron cinco datos de presión de manera que se pudiera tener una estimación de la forma de la estela generada y calcular las velocidades del viento posteriores al dispositivo. El voltaje se midió con ayuda del multímetro.

4. Se repitieron los pasos dos y tres en siete ocasiones para velocidades de viento entre 4 y 10 [m/s].

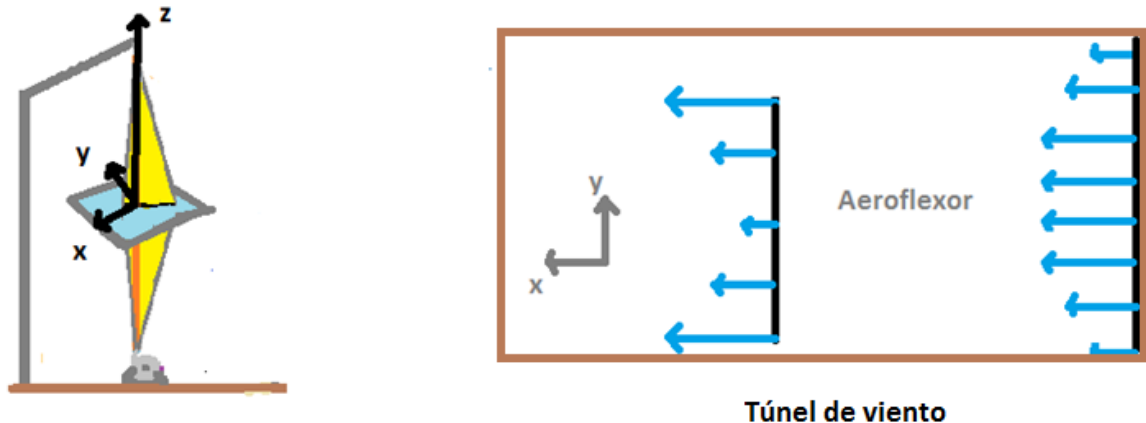


Fig. 5.1.1.1.1 Esquema de la colocación del Aeroflexor en el túnel de viento y ubicación de las tomas de velocidad de viento posteriores al dispositivo.

La prueba de eficiencia mecánica permitió calcular el coeficiente de potencia del Aeroflexor al convertir energía cinética del viento a energía mecánica. Esta prueba consistió en:

1. Se ajustó la base del Aeroflexor en la base principal, aquella con las perforaciones en una circunferencia, y se colocó el arreglo dentro del túnel de viento.
2. Se fijó el tubo tensionándolo con un cordón desde el orificio superior al techo del túnel de viento. Se colocó el Aeroflexor en su base ajustando el cojinete superior al tubo y el inferior a un lazo que lo conecta con un dinamómetro. El dinamómetro se alineó de manera longitudinal con el lazo después de haberlo girado un ángulo de  $90^\circ$  con ayuda de una polea debido a disposiciones de espacio. El dinamómetro se fijó a la tabla con cinta adhesiva.  
Se debe dejar cierta holgura para que la cuerda del ala se encuentre a 160 [mm] del tubo en el punto más próximo al momento de estar girando sin que se registre un valor en el dinamómetro. Se colocó una manta sobre la parte traslúcida del túnel de viento para poder medir la frecuencia de giro con el estroboscopio.
3. Se reguló la velocidad del viento a 3.50 [m/s] y se esperó a que giro de la vela se estabilizara.
4. Se registraron los datos de velocidad del viento antes del dispositivo con ayuda de un tubo de Pitot, la frecuencia de giro con ayuda del estroboscopio y

se empleó el dinamómetro para medir la fuerza máxima, mínima y la distancia desplazada.

5. Se repitieron los pasos dos y tres en nueve ocasiones aumentando la velocidad del viento en cada una de ellas.
6. Sin modificar el arreglo experimental y con el túnel de viento apagado, se tensó la vela hasta dónde se registró en el dinamómetro la primera fuerza máxima. Manteniendo dicha posición, se midieron con un flexómetro las longitudes "r" y "s", que corresponden a la mitad de la magnitud del eje mayor y del eje menor de la elipse formada por el área proyectada.

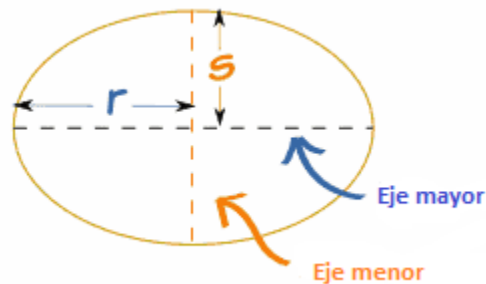


Fig. 5.1.1.1.2 Longitudes "r" y "s" medidas en el paso seis de la prueba mecánica del Aeroflexor.

#### 5.1.1.2. Dispositivos Piezoeléctricos

La prueba de eficiencia para un solo dispositivo cuyo principio de funcionamiento es la piezoelectricidad, es decir Giro-Wind y Piezo-Leaf, consistió en:

1. El arreglo correspondiente se colocó en la estructura metálica montada sobre la base giratoria. La altura a la que se colocaron los dispositivos estuvo determinada por la zona en la que la capa límite cercana a las paredes internas del túnel de viento ya no pudiera provocar alteraciones en las mediciones.
2. Se ubicó el tubo de Pitot para conocer la altura máxima que éste podía medir y se alineó el dispositivo de forma que la corriente de aire que incidiera en el instrumento fuera la misma que incidía sobre la parte central del dispositivo estudiado.
3. El Tubo de Pitot fue conectado a un micromanómetro de presión relativa.
4. En el panel de mando del túnel de viento se reguló la velocidad del aire dentro del túnel para que fuera de 4 [m/s].
5. Se midió la presión del aire detrás del dispositivo de forma que se pudiera conocer la diferencia de presiones y la velocidad del viento una vez que pasó a través de la zona ocupada por el arreglo en estudio.

6. Se leyó la diferencia de voltaje entre las caras del piezoeléctrico después de que pasaron 30 segundos de haber iniciado el funcionamiento del túnel de viento, de forma que ya se hubiera alcanzado un estado permanente y la variación en las mediciones en el multímetro se hubiera estabilizado lo más posible. La carga eléctrica conectada fue el potenciómetro de  $1[M\Omega]$  igual que en el caso de la prueba eléctrica del Aeroflexor. De cualquier manera se tomaron series de cinco datos para obtener el promedio y la desviación estándar posteriormente.
7. Se repitieron los pasos 4, 5 y 6, para velocidades frontales de 6, 8 y 10 [m/s].
8. Se calcularon las diferencias de presiones y las velocidades a la salida del dispositivo.

Este procedimiento se llevó a cabo para ambos dispositivos y los arreglos de brazos de palanca y geometrías de diferentes tamaños de cada uno de ellos.

Además de lo anterior se realizaron pruebas para determinar la influencia del ángulo de incidencia de la corriente de aire para una configuración muestra del Piezo-Leaf, pues el ángulo de incidencia de la corriente de aire no afecta considerablemente al Giro-Wind.

La prueba consistió en:

1. Se repitieron los pasos de la prueba antes mencionada, y estos datos se consideraron como los resultados para cuando los dispositivos reciben la corriente de aire directamente de frente, es decir con un ángulo de cero grados.
2. Se modificó la posición de la base giratoria de forma que el dispositivo se encontrara formando un ángulo de 45 grados con respecto a la corriente de aire generada por el túnel de viento.
3. Se tomaron los datos para las presiones en la parte frontal del dispositivo y posteriormente a la salida de este. Esto se realizó para las velocidades frontales antes mencionadas, es decir, 4, 6, 8 y 10 [m/s].
4. Se midió la diferencia de voltaje en estado permanente para la posición en cuestión, teniendo el dispositivo conectado a una carga de  $1 [m\Omega]$ . Obteniéndose de esta manera series de datos a fin de poder obtener un voltaje promedio y una desviación estándar.
5. Se obtuvieron las diferencias de presión y se calcularon las velocidades a la salida de los dispositivos con los datos recopilados experimentalmente.
6. Se repitieron los pasos 2, 3, 4 y 5, para ángulos de incidencia de la corriente: de 90 grados, 135 grados y 180 grados.

### 5.1.2. Eficiencia Colectiva

#### 5.1.2.1. Aeroflexor

De la misma manera que en la prueba de eficiencia individual, se realizaron un par de pruebas de eficiencia colectiva. Primeramente midiendo la eficiencia de la transducción a energía eléctrica y posteriormente midiendo dicha transducción a energía mecánica solamente. Ambas pruebas nos arrojaron valores del coeficiente de potencia ( $C_p$ ) que nos permitieron comparar ambos métodos.

La prueba de eficiencia colectiva para la prueba eléctrica consistió en medir el cambio en la potencia eléctrica del Aeroflexor con generador debido a la alteración de la corriente de aire por la presencia de otro dispositivo de las mismas características en el entorno.

1. Se ajustó el Aeroflexor acoplado a un generador en la base, de forma que estuviera en la posición más alejada al origen del flujo de aire en el túnel de viento.
2. Se reguló la velocidad del viento a 4.9 [m/s], debido a que fue el valor con mayor coeficiente de potencia alcanzado en la prueba de eficiencia individual mecánica. Esta velocidad de viento se mantuvo constante durante toda la prueba.
3. Se registraron los valores de voltaje alterno con ayuda del multímetro.
4. Se realizaron las mismas mediciones añadiendo el Aeroflexor con base simple en la posición más cercana al origen del viento.
5. Se repitieron las mismas mediciones aproximando el Aeroflexor con generador una distancia de 35 [mm] en cada ocasión, hasta obtener 10 mediciones en total, siendo la distancia más cercana entre ambos dispositivos de 370 [mm].

La prueba mecánica de eficiencia colectiva consistió en medir el cambio en la potencia mecánica del Aeroflexor debido a la alteración de la corriente de aire por la presencia de otro dispositivo de las mismas características en el entorno.

1. Se ajustó la base del Aeroflexor en la base principal, colocándose el dispositivo en la posición más alejada del origen del flujo de aire en el túnel de viento. Se ajustó el cojinete superior al tubo y el inferior a un lazo que lo conectaba con un dinamómetro. El otro extremo del dinamómetro se sujetó al tubo inferior del túnel de viento quedando a tensión.

Se le dejó cierta holgura buscando que la cuerda del ala se encontrara a 160 [mm] del tubo en el punto más próximo al momento de estar girando sin que se registrara un valor en el dinamómetro. Se colocó una manta oscura

cubriendo la parte traslucida del túnel de viento para poder utilizar el estroboscopio.

2. Se reguló la velocidad del viento a 4.9 [m/s], correspondiente al valor con mayor coeficiente de potencia en la prueba de eficiencia de un solo dispositivo Aeroflexor. Esta velocidad se mantuvo constante durante toda la prueba.
3. Se registraron los valores de fuerza máxima y mínima en el dinamómetro y la frecuencia de giro del Aeroflexor simple.
4. Se realizaron las mismas mediciones añadiendo el Aeroflexor con el generador en la posición más cercana al origen del viento.
5. Se realizaron las mismas mediciones anteriores pero aproximando el Aeroflexor con generador una distancia de 35 [mm] en cada ocasión, hasta obtener 10 mediciones en total, siendo la distancia más cercana entre ambos dispositivos de 370 [mm].
6. Se midieron las longitudes “r” y “s” tal cual se indica en el punto seis del desarrollo del experimento de la prueba de eficiencia individual mecánica del Aeroflexor. Ver paso 6 de la prueba mecánica descrita en la sección 5.1.1.1 de este capítulo.

#### 5.1.2.2. Dispositivos Piezoeléctricos

Para conocer el funcionamiento de los dispositivos piezoeléctricos, Giro-Wind y Piezo-Leaf, cuando se encuentran rodeados de otros dispositivos iguales, se realizó la siguiente prueba en la que se varió la densidad de dispositivos:

Piezo-Leaf:

1. Se realizaron geometrías iguales a las del dispositivo en cuestión, de forma que aunque no se tuvieran más piezoeléctricos para medir el funcionamiento de estos en dos puntos, se pudiera simular el efecto que tendrían otros dispositivos colocados en las cercanías de aquel que contaba con el piezoeléctrico.
2. Se colocaron estas geometrías en la estructura metálica principal y se realizaron las mediciones de presiones, a la entrada y a la salida de los dispositivos, para el rango de velocidad estudiado en las anteriores pruebas.
3. Se modificaron las posiciones de los arreglos de forma que los dispositivos se encontraran más cerca unos de otros con cada toma de datos. Para cada una de las nuevas posiciones se volvieron a tomar los datos mencionados en el paso anterior.
4. Se compararon los resultados de forma que se pudo conocer cual debe de ser la separación vertical mínima entre cada uno de los arreglos del dispositivo, que garantice evitar alteraciones y turbulencia en la corriente que incide en el dispositivo colocado más cerca.



Se pretendió realizar la medición de la influencia de otros dispositivos también en el plano horizontal para el Piezo-Leaf, sin embargo el tamaño del túnel de viento no permitió desplazar los arreglos la distancia suficiente como para encontrar el valor mínimo que esta debe de tener para que no existan alteraciones considerables en el funcionamiento de los dispositivos ubicados a espaldas del primero sobre el que incide la corriente de aire.

Giro-Wind:

1. Se realizó una geometría igual a la probada en la versión final del Giro-Wind, es decir, un cubo de 50 [mm] de longitud por lado con una geometría triangular que desequilibrara el movimiento del mismo al incidir una corriente de aire sobre ella.
2. Se colocó esta geometría en una base sujeta a la estructura metálica principal, de forma que se pudiera cambiar la distancia horizontalmente medida entre el dispositivo a prueba y la geometría antes mencionada.
3. Se realizaron las mediciones de presiones, a la entrada y a la salida de los dispositivos, para la configuración con el brazo de palanca de 150 [mm].
4. Se modificaron las posiciones a las que se ubicó la geometría de forma que se encontrara cada vez más cercana al arreglo de Giro-Wind y se volvieron a tomar los datos del paso tres.
5. Se compararon los resultados para observar si el dispositivo Giro-Wind sufre alteraciones significativas cuando se encuentran delante de él otras geometrías semejantes.

La medición de la densidad en el plano vertical no se llevó a cabo debido a que el movimiento de los cubos pertenecientes a otros arreglos de Giro-Wind no alterarían de forma significativa la corriente de aire incidiendo en arreglos ubicados justo por debajo o por arriba de otro dispositivo Giro-Wind.

## 5.2. Resultados obtenidos

### 5.2.1. Aeroflexor

Durante las pruebas realizadas al Aeroflexor, las condiciones del aire en el túnel de viento se mantuvieron alrededor de las mostradas en la Tabla 5.2.1.1. Dichas condiciones se calcularon midiendo la temperatura ambiente, así como la presión atmosférica en el laboratorio de pruebas. Se consideró una constante específica del aire de 287.3 [J/kg\*K] y se emplearon las ecuaciones del gas ideal que se muestran a continuación. Estos cálculos se llevaron a cabo cada que las condiciones dentro del laboratorio cambiaban.

$$P = \rho RT \quad (5.2.1.1)$$

Entonces:

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (5.2.1.2)$$

Donde  $\rho$  es la densidad del aire en  $[\text{kg}/\text{m}^3]$ , que es el parámetro que nos interesó conocer,  $P$  es la presión en  $[\text{Pa}]$   $T$  es la temperatura del aire en  $[\text{K}]$  y  $R$  es la constante específica del aire en  $[\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}]$ .

Tabla 5.2.1.1

Condiciones del aire en el laboratorio durante las pruebas del Aeroflexor.

|                                  |        |                                    |        |
|----------------------------------|--------|------------------------------------|--------|
| <b>Temperatura [K]</b>           | 297.15 | <b>Presión [KPa]</b>               | 77.727 |
| <b>R<sub>aire</sub> [J/kg*K]</b> | 287.3  | <b>Densidad [kg/m<sup>3</sup>]</b> | 0.9105 |

#### 5.2.1.1. Prueba de eficiencia individual

Los datos obtenidos de la prueba de eficiencia individual de la parte eléctrica y aerodinámica fueron los mostrados en la Tabla. 5.2.1.1.1.

Tabla. 5.2.1.1.1

Resultados obtenidos para la prueba de tipo eléctrica de eficiencia individual del Aeroflexor.

| <b>Velocidad del viento antes del dispositivo [m/s]</b> | <b>Voltaje RMS [V]</b> | <b>Velocidades del viento posteriores al dispositivo [m/s]</b> |          |               |          |                |
|---|------------------------|--|----------|---------------|----------|----------------|
|   |                        | <b>Izquierda</b>   | <b>2</b> | <b>Centro</b> | <b>4</b> | <b>Derecha</b> |
| 4   | 0.000                  | 3.890  | 3.820    | 3.834         | 3.890    | 3.959          |
| 5   | 0.000                  | 4.877  | 4.877    | 4.532         | 4.932    | 4.987          |
| 6   | 0.030                  | 5.647  | 5.502    | 5.502         | 5.599    | 5.695          |
| 7   | 0.050                  | 7.052  | 6.975    | 6.858         | 7.052    | 7.090          |
| 8   | 0.070                  | 7.850  | 7.711    | 7.641         | 7.781    | 7.919          |
| 9   | 0.080                  | 8.944  | 8.823    | 8.761         | 8.884    | 9.005          |
| 10  | 0.100                  | 9.864  | 9.698    | 9.754         | 9.809    | 9.973          |

Donde las velocidades del viento posteriores al dispositivo están medidas desde el extremo izquierdo, barriendo el área hasta llegar al extremo derecho posterior al Aeroflexor. Siendo el valor del centro el tercero reportado.

La potencia del aire se obtuvo a partir de la ecuación 2.1.2.25 y el coeficiente de rendimiento se calculó con la ecuación 2.1.2.26.

Los resultados arrojados por los datos recopilados experimentalmente y mostrados en la Tabla 5.2.1.1.1. se muestran en la Tabla 5.2.1.1.2. a continuación. Donde la potencia eléctrica y la corriente eléctrica se calcularon experimentalmente a partir de los datos de voltaje rms medidos experimentalmente y considerando el valor de la carga utilizada como 0.98 [MΩ]. Utilizando las siguientes fórmulas:

$$I = \frac{V}{R} \quad (5.2.1.3)$$

$$P = RI^2 \quad (5.2.1.4)$$

Debido a que el circuito empleado para la toma de datos es de tipo resistivo, no existe desfase. Entonces se pueden emplear las ecuaciones anteriores (5.2.1.3 y 5.2.1.4), en caso de que existiera un desfase se tendría que emplear la siguiente ecuación:

$$P_{activa} = (I_{eficaz}V_{eficaz}) \cos \theta \quad (5.2.1.5)$$

Donde  $\theta$  sería el ángulo del desfaseamiento.

Tabla 5.2.1.1.2

Potencia eléctrica obtenida para la prueba de eficiencia individual del Aeroflexor.

| Velocidad del viento<br>[m/s] | Promedios<br>Voltaje RMS<br>[V] | Corriente<br>eléctrica [mA] | Potencia<br>eléctrica<br>[mW] |
|-------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| 4.00                          | 0.00                            | 0.000                       | 0.000                         |
| 5.00                          | 0.00                            | 0.000                       | 0.000                         |
| 6.00                          | 0.03                            | 30.61E-6                    | 0.918E-6                      |
| 7.00                          | 0.05                            | 51.02E-6                    | 2.551E-6                      |
| 8.00                          | 0.07                            | 71.43E-6                    | 5.000E-6                      |
| 9.00                          | 0.08                            | 81.63E-6                    | 6.530E-6                      |
| 10.0                          | 0.10                            | 102.0E-6                    | 10.20E-6                      |

Los datos obtenidos de la prueba de eficiencia individual de la parte mecánica fueron los mostrados en la Tabla. 5.2.1.1.3.

El área proyectada considerada en las siguientes tablas se supondrá como una elipse cuya área se calcula de la siguiente manera:

$$A_{proyectada} = \pi * r * s \quad (5.2.1.6)$$

Para el cálculo del coeficiente de potencia del Aeroflexor se decidió tomar el valor de la velocidad del viento posterior al dispositivo en la zona del centro, pues es la zona donde parece ser que mayor energía se le extrae al viento y por consiguiente es el valor más significativo para el cálculo. Los resultados se muestran a continuación en la Tabla 5.2.1.1.3. La potencia del viento y la potencia extraída se obtuvieron mediante las ecuaciones 2.1.2.23 y 2.1.2.24 respectivamente, considerando tanto la densidad del aire en el momento de realizarse las pruebas, como el área proyectada para cada caso.

Tabla 5.2.1.1.3

Obtención del coeficiente de potencia del Aeroflexor de forma meramente aerodinámica.

| Velocidad del viento anterior [m/s] | Velocidad del viento posterior [m/s] | Área proyectada [m <sup>2</sup> ] | Potencia del viento [W] | Potencia extraída [W] | Coficiente de potencia |
|-------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|-----------------------|------------------------|
| 4.00                                | 3.834                                | 0.060                             | 1.748                   | 0.138                 | 0.080                  |
| 5.00                                | 4.532                                | 0.075                             | 4.268                   | 0.726                 | 0.170                  |
| 6.00                                | 5.502                                | 0.064                             | 6.293                   | 0.960                 | 0.153                  |
| 7.00                                | 6.858                                | 0.081                             | 12.65                   | 0.503                 | 0.040                  |
| 8.00                                | 7.641                                | 0.085                             | 19.81                   | 1.699                 | 0.086                  |
| 9.00                                | 8.761                                | 0.097                             | 32.19                   | 1.665                 | 0.052                  |
| 10.0                                | 9.754                                | 0.102                             | 46.44                   | 2.229                 | 0.048                  |

Tabla 5.2.1.1.4

Eficiencia individual del Aeroflexor para la parte mecánica.

| Velocidad viento [m/s] | Frecuencia de giro vela [Hz] | Fuerza mínima [N] | Fuerza máxima [N] | Distancia [m] | s [m] | r [m] |
|------------------------|------------------------------|-------------------|-------------------|---------------|-------|-------|
| 3.50                   | 2.17                         | 0.00              | 0.35              | 0.007         | 0.062 | 0.220 |
| 4.13                   | 2.57                         | 0.25              | 0.45              | 0.004         | 0.090 | 0.212 |
| 4.75                   | 2.83                         | 0.50              | 0.80              | 0.006         | 0.098 | 0.207 |
| 5.31                   | 3.23                         | 0.70              | 1.00              | 0.006         | 0.114 | 0.209 |
| 5.93                   | 3.60                         | 0.70              | 0.80              | 0.002         | 0.098 | 0.207 |
| 6.55                   | 4.00                         | 0.90              | 1.10              | 0.004         | 0.114 | 0.209 |
| 7.10                   | 4.45                         | 1.30              | 1.35              | 0.001         | 0.120 | 0.214 |
| 7.86                   | 4.77                         | 1.35              | 1.55              | 0.004         | 0.122 | 0.215 |
| 8.46                   | 5.02                         | 1.55              | 1.75              | 0.004         | 0.124 | 0.218 |
| 9.07                   | 5.18                         | 1.80              | 2.00              | 0.004         | 0.140 | 0.220 |

Los resultados del coeficiente de potencia arrojados por los datos recopilados experimentalmente con la carga mecánica representada por el dinamómetro se muestran en la Tabla 5.2.1.1.5. a continuación.

Tabla 5.2.1.1.5

Obtención del coeficiente de potencia de la prueba mecánica del Aeroflexor.

| Velocidad viento [m/s] | Área proyectada [m <sup>2</sup> ] | Potencia del aire [W] | Tiempo [s] | Trabajo del ala [J] | Potencia [W] | Coefficiente de potencia |
|------------------------|-----------------------------------|-----------------------|------------|---------------------|--------------|--------------------------|
| 3.50                   | 0.043                             | 0.834                 | 0.231      | 0.0012              | 0.0053       | 0.0064                   |
| 4.13                   | 0.060                             | 1.916                 | 0.195      | 0.0014              | 0.0072       | 0.0038                   |
| 4.75                   | 0.064                             | 3.092                 | 0.177      | 0.0039              | 0.0221       | 0.0072                   |
| 5.31                   | 0.075                             | 5.074                 | 0.155      | 0.0051              | 0.0330       | 0.0065                   |
| 5.93                   | 0.064                             | 6.017                 | 0.139      | 0.0015              | 0.0108       | 0.0018                   |
| 6.55                   | 0.075                             | 9.523                 | 0.125      | 0.0040              | 0.0320       | 0.0034                   |
| 7.10                   | 0.081                             | 13.07                 | 0.112      | 0.0013              | 0.0118       | 0.0009                   |
| 7.86                   | 0.082                             | 18.16                 | 0.105      | 0.0058              | 0.0553       | 0.0031                   |
| 8.46                   | 0.085                             | 23.28                 | 0.100      | 0.0066              | 0.0662       | 0.0028                   |
| 9.07                   | 0.097                             | 32.77                 | 0.097      | 0.0076              | 0.0788       | 0.0024                   |

A continuación se muestra la gráfica del coeficiente de potencia de Betz (Cp) obtenido sin carga contra la velocidad del viento empleada para la toma de datos.

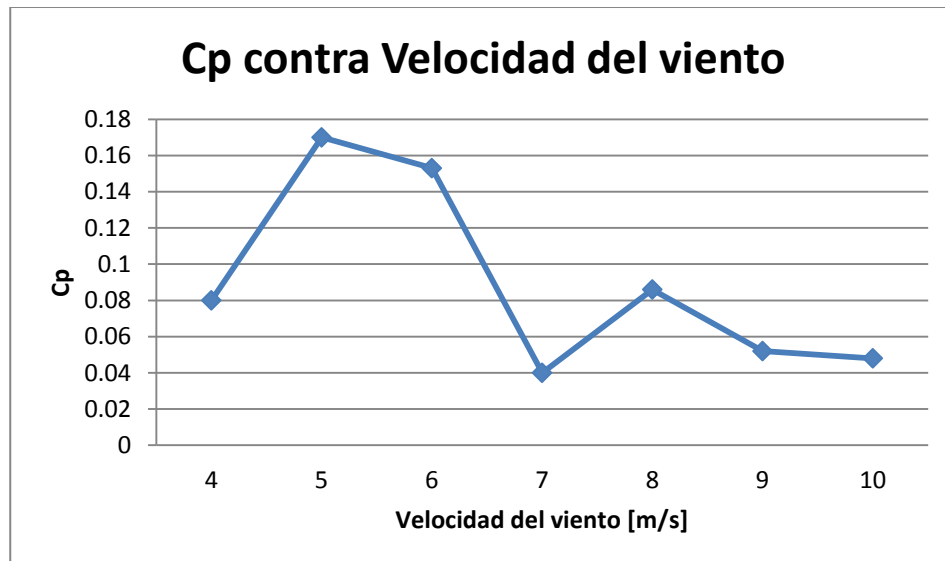


Fig. 5.2.1.1.1

Coefficiente de potencia contra velocidad del viento para el Aeroflexor, calculado de forma meramente aerodinámica.

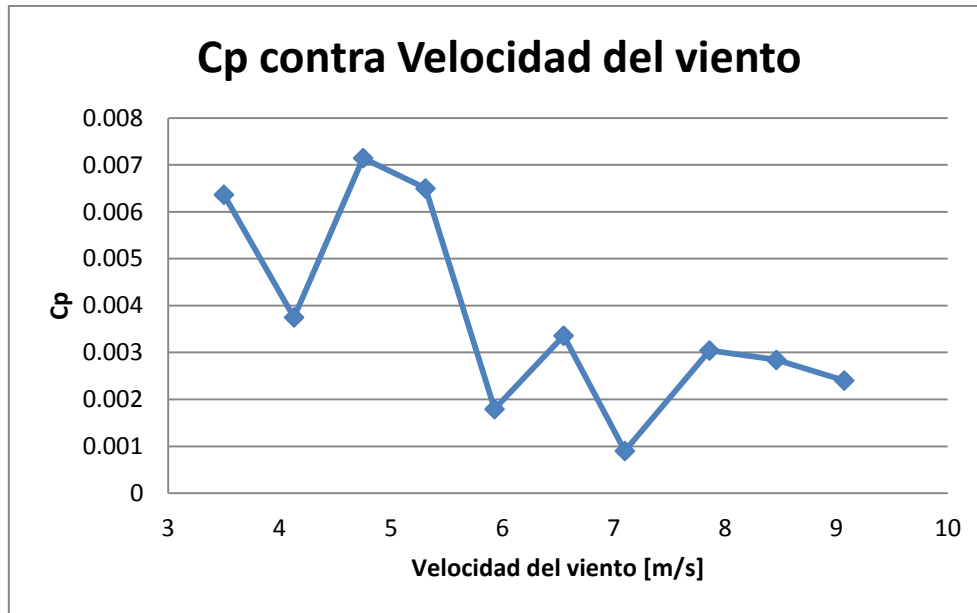


Fig. 5.2.1.1.2

Coefficiente de potencia contra velocidad del viento para el Aeroflexor, calculado con los datos de la prueba mecánica.

En ambas gráficas podemos observar una disminución del coeficiente de potencia conforme se incrementa la velocidad del viento, lo que nos indica que el funcionamiento del Aeroflexor debe de enfocarse a velocidades de viento no muy elevadas de forma que el dispositivo sea capaz de en proporción, extraer mayor cantidad de energía. Asimismo se observa una diferencia que en algunos casos es considerable, entre los coeficientes de potencia obtenidos mecánicamente y aerodinámicamente, esto es debido a que en la prueba mecánica la medición se llevó a cabo con el dinamómetro, en donde la fuerza generada había sufrido una transducción que evidentemente es menos eficiente que la transducción realizada únicamente por la vela girando. Esto pudo deberse a las tolerancias y la holgura del mecanismo empleado, condiciones que provocaron cierta pérdida de energía mayor que la medida en la pérdida de la velocidad del aire en la zona posterior al dispositivo. En esta medición se está considerando que toda la energía se transduce en el movimiento del ala y no únicamente en el extremo inferior que es el que en la prueba meramente mecánica transmite la fuerza al dinamómetro.

en el motor eléctrico empleado como generador no se presentó. Aunado a lo anterior, la medición en la prueba mecánica puede incluir una mayor cantidad de errores en la parte de la medición del tiempo principalmente.

Sin embargo en lo que respecta a potencia obtenida, mientras mayor sea la velocidad del viento, mayor potencia se puede obtener del Aeroflexor, aunque su funcionamiento sea menos eficiente para dichas velocidades. En la siguiente figura se muestra la potencia obtenida para las diferentes velocidades de viento

analizadas, pudiéndose ver que el aprovechamiento de energía en el Aeroflexor conviene que sea en forma mecánica y no eléctrica, al menos bajo las condiciones de las pruebas realizadas, pues la potencia obtenida de tipo eléctrica es mucho menor que la potencia mecánica.

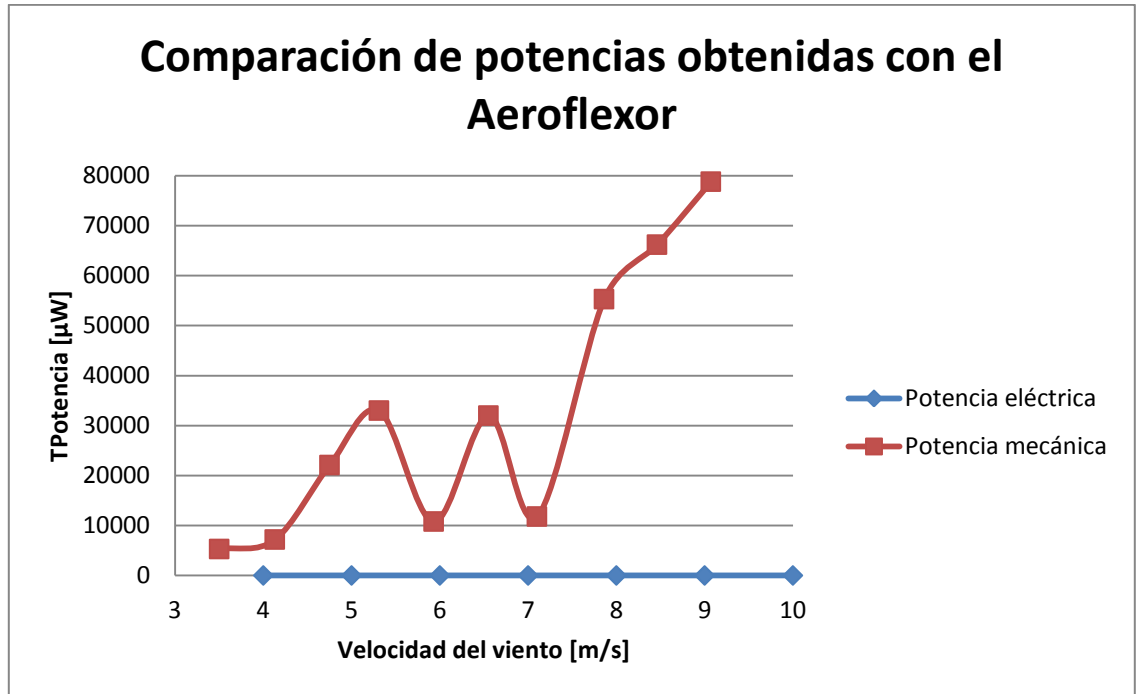


Fig. 5.2.1.1.3

Comparación de las potencias medidas, eléctrica y mecánica, para las diferentes velocidades analizadas.

Para poder observar más claramente la potencia eléctrica obtenida, se grafica a continuación, en la Fig. 5.2.1.1.4.

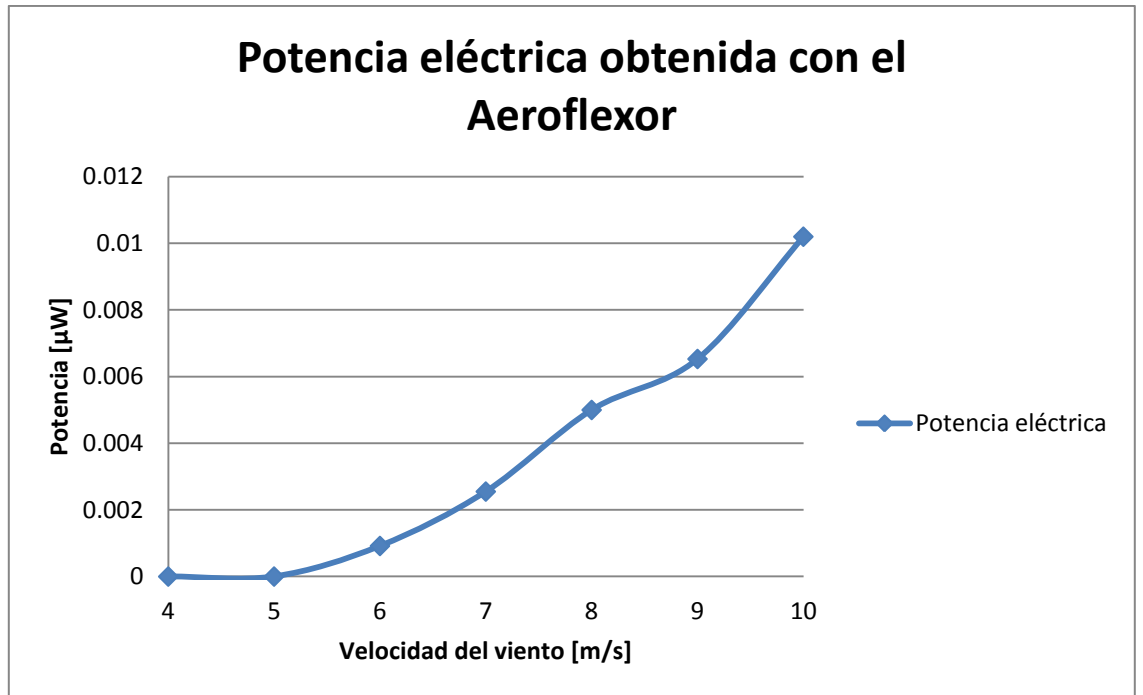


Fig. 5.2.1.1.4

Potencia eléctrica obtenida con el Aeroflexor acoplado a un motor eléctrico como generador.

A continuación se muestra una gráfica donde se compara el coeficiente de potencia de Betz ( $C_p$ ) obtenido con la curva del coeficiente de potencia, para las velocidades del viento empleadas en la toma de datos.



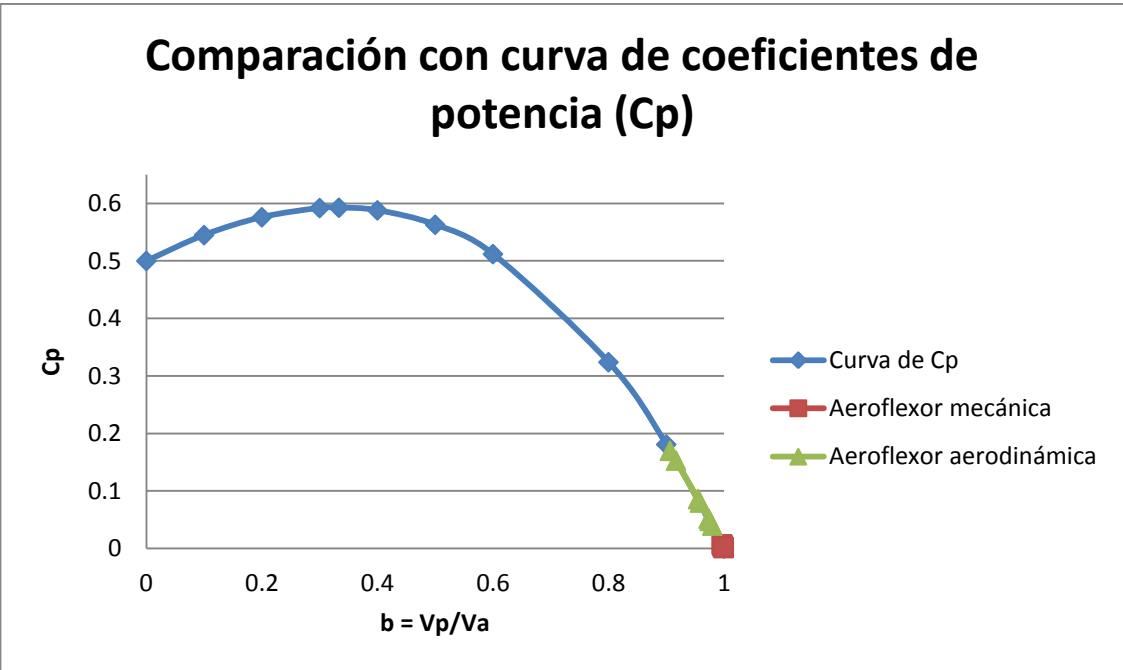


Fig. 5.2.1.1.5  
 Comparación de los coeficientes de potencia obtenidos contra la curva de coeficiente de potencia.

### 5.2.1.2. Prueba de eficiencia colectiva

Nunca fue estable el movimiento del ala cuando se encontraba cerca de otro dispositivo Aeroflexor en funcionamiento, por lo tanto la generación eléctrica no pudo ser medida.

En relación con la parte mecánica, el funcionamiento también fue muy irregular y realmente nunca se obtuvo un comportamiento aceptable cuando otro dispositivo Aeroflexor se encontraba en las cercanías, sin embargo la fuerza mecánica para algunas velocidades de viento si pudo ser medida con el dinamómetro y a continuación en la Tabla 5.2.1.2.1 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 5.2.1.2.1

Pruebas de eficiencia colectiva para la parte mecánica en el Aeroflexor.

| Prueba | Fuerza mínima [N] | Fuerza máxima [N] | Frecuencia de giro [Hz] | S [m] | R [m] |
|--------|-------------------|-------------------|-------------------------|-------|-------|
| 0      | 0.70              | 1.00              | Irregular               | NA    | NA    |
| 1      | 0.40              | 0.65              | Irregular               | NA    | NA    |
| 2      | 0.35              | 0.50              | Irregular               | NA    | NA    |
| 3      | 0.20              | 0.40              | Irregular               | NA    | NA    |
| 4      | 0.00              | 0.35              | Irregular               | NA    | NA    |
| 5      | 0.00              | 0.32              | Irregular               | NA    | NA    |
| 6      | 0.00              | NA                | Irregular               | NA    | NA    |
| 7      | 0.00              | NA                | Irregular               | NA    | NA    |
| 8      | 0.00              | NA                | Irregular               | NA    | NA    |
| 9      | 0.00              | NA                | Irregular               | NA    | NA    |
| 10     | 0.00              | NA                | Irregular               | NA    | NA    |

Dado lo anterior, los resultados obtenidos de la prueba de eficiencia colectiva de la parte mecánica son los siguientes, mostrados en la Tabla. 5.2.1.2.3.

Tabla. 5.2.1.2.2

Resultados de las pruebas de eficiencia colectiva de la parte mecánica del Aeroflexor.

| Distancia entre dispositivos [mm] | Fuerza Promedio [N] |
|-----------------------------------|---------------------|
| 720                               | 0.850               |
| 685                               | 0.525               |
| 650                               | 0.425               |
| 615                               | 0.300               |

|     |       |
|-----|-------|
| 580 | 0.175 |
| 545 | 0.160 |
| 510 | NA    |
| 475 | NA    |
| 440 | NA    |
| 405 | NA    |
| 370 | NA    |

### 5.2.2. Piezo-Leaf

Las pruebas realizadas a las distintas configuraciones se muestran a continuación, la toma de los valores de voltaje se realizó con una carga eléctrica de 1 [MΩ] obtenida al conectar un potenciómetro a la salida de las terminales del piezoeléctrico. Esto nos permitió calcular la corriente eléctrica y posteriormente la potencia eléctrica de forma meramente teórica a partir del dato de diferencia de voltaje leído en la parte experimental.

Estos datos nos permiten conocer el potencial y el funcionamiento que podría llegar a tener el dispositivo funcionando a diferentes velocidades de viento, sin embargo para realmente medir la potencia eléctrica se necesitaría también de una medición experimental de la corriente eléctrica, a fin de poder calcular más confiablemente la potencia eléctrica. En las siguientes tablas se muestran los valores de funcionamiento del Piezo-Leaf para la prueba de eficiencia individual.



Fig. 5.2.2.1 Arreglo Piezo-Leaf en la estructura metálica para las pruebas en el túnel de viento.

Las siguientes pruebas se realizaron con las condiciones de aire en el laboratorio mostradas a continuación.

Tabla 5.2.2.1.

Condiciones del aire en el laboratorio durante las pruebas del Piezo-Leaf.

|                                  |        |                                    |        |
|----------------------------------|--------|------------------------------------|--------|
| <b>Temperatura [K]</b>           | 296.15 | <b>Presión [KPa]</b>               | 77.078 |
| <b>R<sub>aire</sub> [J/kg*K]</b> | 287.3  | <b>Densidad [kg/m<sup>3</sup>]</b> | 0.9059 |

Eficiencia individual

Tabla 5.2.2.2.

Brazo de palanca rectangular de 100 [mm] hecho con Alucobond®.

| <b>Vanterior [m/s]</b>    | <b>Vposterior [m/s]</b> | <b>Voltaje RMS Promedio [V]</b> | <b>Corriente eléctrica [mA]</b> | <b>Potencia eléctrica [mW]</b> | <b>Desviación estándar</b> |
|---------------------------|-------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|----------------------------|
| <b>Triángulo 50 [mm]</b>  |                         |                                 |                                 |                                |                            |
| 4                         | 3.119                   | 0.057                           | 58.6 E-6                        | 3.36 E-6                       | 0.011                      |
| 6                         | 5.199                   | 0.154                           | 157 E-6                         | 24.2 E-6                       | 0.020                      |
| 8                         | 6.410                   | 0.312                           | 318 E-6                         | 99.3 E-6                       | 0.025                      |
| 10                        | 7.352                   | 0.576                           | 588 E-6                         | 339 E-6                        | 0.050                      |
| <b>Triángulo 75 [mm]</b>  |                         |                                 |                                 |                                |                            |
| 4                         | 3.288                   | 0.070                           | 71.2 E-6                        | 4.97 E-6                       | 0.009                      |
| 6                         | 5.199                   | 0.284                           | 290 E-6                         | 82.3 E-6                       | 0.020                      |
| 8                         | 6.738                   | 0.620                           | 633 E-6                         | 392 E-6                        | 0.055                      |
| 10                        | 8.054                   | 1.170                           | 1.19 E-6                        | 1.40 E-3                       | 0.108                      |
| <b>Triángulo 100 [mm]</b> |                         |                                 |                                 |                                |                            |
| 4                         | 3.602                   | 0.236                           | 0.24 E-3                        | 56.8 E-6                       | 0.037                      |
| 6                         | 4.027                   | 0.686                           | 0.70 E-3                        | 480 E-6                        | 0.052                      |
| 8                         | 6.897                   | 1.500                           | 1.53 E-3                        | 2.30 E-3                       | 0.110                      |
| 10                        | 8.447                   | 3.100                           | 3.16 E-3                        | 9.81 E-3                       | 0.200                      |

Tabla 5.2.2.3.

Brazo de palanca delgado de 100 [mm] hecho con Alucobond®.

| Vanterior [m/s]           | Vposterior [m/s] | Voltaje RMS Promedio [V] | Corriente eléctrica [mA] | Potencia eléctrica [mW] | Desviación estándar |
|---------------------------|------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|---------------------|
| <b>Triángulo 50 [mm]</b>  |                  |                          |                          |                         |                     |
| 4                         | 3.288            | 0.100                    | 102 E-6                  | 10.2 E-6                | 0.029               |
| 6                         | 5.094            | 0.266                    | 271 E-6                  | 72.2 E-6                | 0.038               |
| 8                         | 6.738            | 0.426                    | 434 E-6                  | 185 E-6                 | 0.089               |
| 10                        | 8.318            | 0.610                    | 622 E-6                  | 380 E-6                 | 0.102               |
| <b>Triángulo 75 [mm]</b>  |                  |                          |                          |                         |                     |
| 4                         | 3.288            | 0.092                    | 93.9 E-6                 | 8.64 E-6                | 0.032               |
| 6                         | 5.302            | 0.324                    | 331 E-6                  | 107 E-6                 | 0.050               |
| 8                         | 6.576            | 0.560                    | 571 E-6                  | 320 E-6                 | 0.086               |
| 10                        | 8.318            | 1.060                    | 1.08 E-3                 | 1.15 E-3                | 0.102               |
| <b>Triángulo 100 [mm]</b> |                  |                          |                          |                         |                     |
| 4                         | 3.602            | 0.052                    | 53.1 E-6                 | 2.76 E-6                | 0.023               |
| 6                         | 5.094            | 0.568                    | 580 E-6                  | 329 E-6                 | 0.077               |
| 8                         | 6.576            | 1.420                    | 1.45 E-3                 | 2.06 E-3                | 0.147               |
| 10                        | 8.447            | 3.600                    | 3.67 E-3                 | 13.2 E-3                | 0.276               |

Tabla 5.2.2.4.

Brazo de palanca rectangular de 150 [mm] hecho con Alucobond®.

| Vanterior [m/s]           | Vposterior [m/s] | Voltaje RMS Promedio [V] | Corriente eléctrica [mA] | Potencia eléctrica [mW] | Desviación estándar |
|---------------------------|------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|---------------------|
| <b>Triángulo 50 [mm]</b>  |                  |                          |                          |                         |                     |
| 4                         | 3.255            | 0.072                    | 73.5 E-6                 | 5.29 E-6                | 0.019               |
| 6                         | 5.789            | 0.366                    | 373 E-6                  | 137 E-6                 | 0.038               |
| 8                         | 6.975            | 0.706                    | 720 E-6                  | 509 E-6                 | 0.054               |
| 10                        | 8.187            | 1.360                    | 1.39 E-3                 | 1.89 E-3                | 0.260               |
| <b>Triángulo 75 [mm]</b>  |                  |                          |                          |                         |                     |
| 4                         | 3.449            | 0.260                    | 265 E-6                  | 69.0 E-6                | 0.049               |
| 6                         | 5.199            | 0.654                    | 667 E-6                  | 436 E-6                 | 0.033               |
| 8                         | 6.738            | 0.952                    | 971 E-6                  | 925 E-6                 | 0.048               |
| 10                        | 8.253            | 1.610                    | 1.64 E-3                 | 2.65 E-3                | 0.081               |
| <b>Triángulo 100 [mm]</b> |                  |                          |                          |                         |                     |
| 4                         | 3.602            | 0.558                    | 569 E-6                  | 318 E-6                 | 0.041               |
| 6                         | 4.159            | 1.330                    | 1.36 E-3                 | 1.81 E-3                | 0.075               |
| 8                         | 6.576            | 2.754                    | 2.81 E-3                 | 7.74 E-3                | 0.139               |
| 10                        | 8.318            | 5.840                    | 5.96 E-3                 | 34.8 E-3                | 0.441               |

Tabla 5.2.2.5.

Brazo de palanca delgado de 150 [mm] hecho con Alucobond®.

| Vanterior<br>[m/s]        | Vposterior<br>[m/s] | Voltaje<br>RMS<br>Promedio<br>[V] | Corriente<br>eléctrica<br>[mA] | Potencia<br>eléctrica<br>[mW] | Desviación<br>estándar |
|---------------------------|---------------------|-----------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|------------------------|
| <b>Triángulo 50 [mm]</b>  |                     |                                   |                                |                               |                        |
| 4                         | 3.288               | 0.128                             | 131 E-6                        | 16.7 E-6                      | 0.026                  |
| 6                         | 5.094               | 0.296                             | 302 E-6                        | 89.4 E-6                      | 0.029                  |
| 8                         | 6.738               | 0.684                             | 698 E-6                        | 477 E-6                       | 0.053                  |
| 10                        | 8.318               | 0.978                             | 998 E-6                        | 976 E-6                       | 0.102                  |
| <b>Triángulo 75 [mm]</b>  |                     |                                   |                                |                               |                        |
| 4                         | 3.288               | 0.182                             | 186 E-6                        | 33.8 E-6                      | 0.018                  |
| 6                         | 5.302               | 0.594                             | 606 E-6                        | 360 E-6                       | 0.067                  |
| 8                         | 6.576               | 1.326                             | 1.35 E-3                       | 1.79 E-3                      | 0.111                  |
| 10                        | 8.318               | 2.420                             | 2.47 E-3                       | 5.98 E-3                      | 0.133                  |
| <b>Triángulo 100 [mm]</b> |                     |                                   |                                |                               |                        |
| 4                         | 3.602               | 0.680                             | 694 E-6                        | 472 E-6                       | 0.075                  |
| 6                         | 5.094               | 2.460                             | 2.51 E-3                       | 6.18 E-3                      | 0.203                  |
| 8                         | 6.576               | 3.220                             | 3.29 E-3                       | 10.6 E-3                      | 0.223                  |
| 10                        | 8.447               | 6.140                             | 6.27 E-3                       | 38.5 E-3                      | 0.258                  |

Tabla 5.2.2.6.

Brazo de palanca rectangular de 170 [mm] hecho con Alucobond®.

| Vanterior<br>[m/s]        | Vposterior<br>[m/s] | Voltaje<br>RMS<br>Promedio<br>[V] | Corriente<br>eléctrica<br>[mA] | Potencia<br>eléctrica<br>[mW] | Desviación<br>estándar |
|---------------------------|---------------------|-----------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|------------------------|
| <b>Triángulo 50 [mm]</b>  |                     |                                   |                                |                               |                        |
| 4                         | 3.288               | 0.199                             | 203 E-6                        | 40.4 E-6                      | 0.023                  |
| 6                         | 4.650               | 0.604                             | 616 E-6                        | 372 E-6                       | 0.036                  |
| 8                         | 6.576               | 1.236                             | 1.26 E-3                       | 1.56 E-3                      | 0.079                  |
| 10                        | 8.187               | 1.712                             | 1.75 E-3                       | 2.99 E-3                      | 0.099                  |
| <b>Triángulo 75 [mm]</b>  |                     |                                   |                                |                               |                        |
| 4                         | 3.449               | 0.234                             | 239 E-6                        | 55.9 E-6                      | 0.015                  |
| 6                         | 5.094               | 0.986                             | 1.01 E-3                       | 992 E-6                       | 0.087                  |
| 8                         | 6.576               | 2.122                             | 2.17 E-3                       | 4.59 E-3                      | 0.099                  |
| 10                        | 8.187               | 3.626                             | 3.70 E-3                       | 13.4 E-3                      | 0.150                  |
| <b>Triángulo 100 [mm]</b> |                     |                                   |                                |                               |                        |
| 4                         | 3.602               | 0.784                             | 800 E-6                        | 627 E-6                       | 0.102                  |
| 6                         | 5.094               | 2.942                             | 3.00 E-3                       | 8.83 E-3                      | 0.144                  |
| 8                         | 6.576               | 4.730                             | 4.83 E-3                       | 22.8 E-3                      | 0.131                  |
| 10                        | 8.447               | 8.048                             | 8.21 E-3                       | 66.1 E-3                      | 0.152                  |

Tabla 5.2.2.7.

Brazo de palanca delgado de 170 [mm] hecho con Alucobond®.

| Vanterior<br>[m/s]        | Vposterior<br>[m/s] | Voltaje<br>RMS<br>Promedio<br>[V] | Corriente<br>eléctrica<br>[mA] | Potencia<br>eléctrica<br>[mW] | Desviación<br>estándar |
|---------------------------|---------------------|-----------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|------------------------|
| <b>Triángulo 50 [mm]</b>  |                     |                                   |                                |                               |                        |
| 4                         | 3.119               | 0.134                             | 137 E-6                        | 18.3 E-6                      | 0.013                  |
| 6                         | 5.199               | 0.320                             | 327 E-6                        | 104 E-6                       | 0.032                  |
| 8                         | 6.410               | 0.970                             | 990 E-6                        | 960 E-3                       | 0.077                  |
| 10                        | 8.054               | 1.598                             | 1.63 E-3                       | 2.61 E-3                      | 0.075                  |
| <b>Triángulo 75 [mm]</b>  |                     |                                   |                                |                               |                        |
| 4                         | 3.449               | 0.244                             | 249 E-6                        | 60.8 E-6                      | 0.030                  |
| 6                         | 5.403               | 0.642                             | 655 E-6                        | 421 E-6                       | 0.042                  |
| 8                         | 6.576               | 1.636                             | 1.67 E-3                       | 2.73 E-3                      | 0.139                  |
| 10                        | 8.699               | 3.320                             | 3.39 E-3                       | 11.2 E-3                      | 0.194                  |
| <b>Triángulo 100 [mm]</b> |                     |                                   |                                |                               |                        |
| 4                         | 3.890               | 0.752                             | 767 E-6                        | 577 E-6                       | 0.074                  |
| 6                         | 5.695               | 2.054                             | 2.10 E-3                       | 4.31 E-3                      | 0.047                  |
| 8                         | 6.576               | 5.080                             | 5.18 E-3                       | 26.3 E-3                      | 0.161                  |
| 10                        | 8.447               | 9.518                             | 9.71 E-3                       | 92.4 E-3                      | 0.292                  |

A continuación se presentan las tablas de todos los arreglos y sus respectivos voltajes RMS promedio, áreas proyectadas y coeficientes de potencia (Cp). Para los siguientes resultados se consideró la ecuación que modela la deflexión de un arreglo bimorph PZT 5A1 [31], de forma que se pudiera calcular el área efectiva considerando que el arreglo se flexiona hacia ambos lados.

$$\delta_{PZT\ 5A1} = 9 \times 10^{-10} \left( \frac{L^2}{h^2} \right), \text{valores dados en } \left[ \frac{m}{V} \right] \quad (5.2.2.1)$$

Donde el valor de  $9 \times 10^{-10}$  es una constante del material, dada por el fabricante para emplear la ecuación anterior, L es la longitud libre y h es el espesor del arreglo bimorph en cantiléver.

De esta manera la ecuación para calcular el área efectiva fue la siguiente:

$$A = \delta_{PZT\ 5A1} * V * l * 2, \text{ en } [m^2] \quad (5.2.2.2)$$

Donde  $\delta_{PZT\ 5A1}$  es la deflexión del bimorph en [m/V], V es el voltaje promedio obtenido en las pruebas experimentales en [V], l es la longitud en el plano vertical del arreglo sobre el que incide el viento en [m], y todo lo anterior se multiplica por dos debido a

que se considera una deformación hacia ambos lados, de la misma magnitud como consecuencia de la incidencia del viento.

La potencia disponible en el viento para el área calculada, así como la potencia extraída por el dispositivo Piezo-Leaf se calcularon de nuevo con las ecuaciones 2.1.2.23 y 2.1.2.24 respectivamente.

Tabla 5.2.2.8

Resultados obtenidos para el brazo de palanca rectangular de 100 [mm] hecho con Alucobond®.

| Va [m/s]                  | Vp [m/s] | Deformación piezoeléctrico [m] | Voltaje Promedio [V] | Área efectiva [m <sup>2</sup> ] | Potencia del viento [W] | Potencia extraída por el P-L [W] | Coficiente de potencia |
|---------------------------|----------|--------------------------------|----------------------|---------------------------------|-------------------------|----------------------------------|------------------------|
| <b>Triángulo 50 [mm]</b>  |          |                                |                      |                                 |                         |                                  |                        |
| 4                         | 3.119    | 0.216 E-6                      | 0.057                | 0.022 E-6                       | 0.625 E-6               | 0.218 E-6                        | 0.3488                 |
| 6                         | 5.199    | 0.582 E-6                      | 0.154                | 0.058 E-6                       | 5.697 E-6               | 1.325 E-6                        | 0.2325                 |
| 8                         | 6.410    | 1.180 E-6                      | 0.312                | 0.118 E-6                       | 27.36 E-6               | 8.821 E-6                        | 0.3224                 |
| 10                        | 7.352    | 2.178 E-6                      | 0.576                | 0.218 E-6                       | 98.65 E-6               | 39.33 E-6                        | 0.3986                 |
| <b>Triángulo 75 [mm]</b>  |          |                                |                      |                                 |                         |                                  |                        |
| 4                         | 3.288    | 0.337 E-6                      | 0.070                | 0.051 E-6                       | 1.466 E-6               | 0.433 E-6                        | 0.2955                 |
| 6                         | 5.199    | 1.368 E-6                      | 0.284                | 0.205 E-6                       | 20.07 E-6               | 4.668 E-6                        | 0.2325                 |
| 8                         | 6.738    | 2.986 E-6                      | 0.620                | 0.448 E-6                       | 103.9 E-6               | 27.80 E-6                        | 0.2677                 |
| 10                        | 8.054    | 5.635 E-6                      | 1.170                | 0.845 E-6                       | 382.8 E-6               | 121.4 E-6                        | 0.3171                 |
| <b>Triángulo 100 [mm]</b> |          |                                |                      |                                 |                         |                                  |                        |
| 4                         | 3.602    | 1.410 E-6                      | 0.236                | 0.282 E-6                       | 8.176 E-6               | 1.469 E-6                        | 0.1797                 |
| 6                         | 4.027    | 4.099 E-6                      | 0.686                | 0.820 E-6                       | 80.21 E-6               | 36.83 E-6                        | 0.4592                 |
| 8                         | 6.897    | 8.963 E-6                      | 1.500                | 1.793 E-6                       | 415.7 E-6               | 99.38 E-6                        | 0.2390                 |
| 10                        | 8.447    | 18.52 E-6                      | 3.100                | 3.705 E-6                       | 1.678 E-3               | 443.4 E-6                        | 0.2642                 |



Tabla 5.2.2.9

Resultados obtenidos para el brazo de palanca delgado de 100 [mm] hecho con Alucobond®.

| Va [m/s]                  | Vp [m/s] | Deformación piezoeléctrico [m] | Voltaje Promedio [V] | Área efectiva [m <sup>2</sup> ] | Potencia del viento [W] | Potencia extraída por el P-L [W] | Coefficiente de potencia |
|---------------------------|----------|--------------------------------|----------------------|---------------------------------|-------------------------|----------------------------------|--------------------------|
| <b>Triángulo 50 [mm]</b>  |          |                                |                      |                                 |                         |                                  |                          |
| 4                         | 3.288    | 0.378 E-6                      | 0.100                | 0.037 E-6                       | 1.096 E-6               | 0.324 E-6                        | 0.2955                   |
| 6                         | 5.094    | 1.006 E-6                      | 0.266                | 0.101 E-6                       | 9.840 E-6               | 2.540 E-6                        | 0.2581                   |
| 8                         | 6.738    | 1.611 E-6                      | 0.426                | 0.161 E-6                       | 37.35 E-6               | 10.00 E-6                        | 0.2677                   |
| 10                        | 8.318    | 2.321 E-6                      | 0.610                | 0.231 E-6                       | 104.5 E-6               | 29.48 E-6                        | 0.2822                   |
| <b>Triángulo 75 [mm]</b>  |          |                                |                      |                                 |                         |                                  |                          |
| 4                         | 3.288    | 0.443 E-6                      | 0.092                | 0.067 E-6                       | 1.927 E-6               | 0.569 E-6                        | 0.2955                   |
| 6                         | 5.302    | 1.560 E-6                      | 0.324                | 0.234 E-6                       | 22.90 E-6               | 4.726 E-6                        | 0.2064                   |
| 8                         | 6.576    | 2.697 E-6                      | 0.560                | 0.405 E-6                       | 93.81 E-6               | 27.72 E-6                        | 0.2955                   |
| 10                        | 8.318    | 5.105 E-6                      | 1.060                | 0.766 E-6                       | 346.8 E-6               | 97.87 E-6                        | 0.2822                   |
| <b>Triángulo 100 [mm]</b> |          |                                |                      |                                 |                         |                                  |                          |
| 4                         | 3.602    | 0.311 E-6                      | 0.052                | 0.062 E-6                       | 1.802 E-6               | 0.323 E-6                        | 0.1797                   |
| 6                         | 5.094    | 3.394 E-6                      | 0.568                | 0.679 E-6                       | 66.41 E-6               | 17.14 E-6                        | 0.2581                   |
| 8                         | 6.576    | 8.485 E-6                      | 1.420                | 1.697 E-6                       | 393.6 E-6               | 116.3 E-6                        | 0.2955                   |
| 10                        | 8.447    | 21.51 E-6                      | 3.600                | 4.302 E-6                       | 1.949 E-3               | 514.9 E-6                        | 0.2642                   |

Los resultados de forma gráfica se pueden observar en la siguiente figura, la Fig. 5.2.2.2.

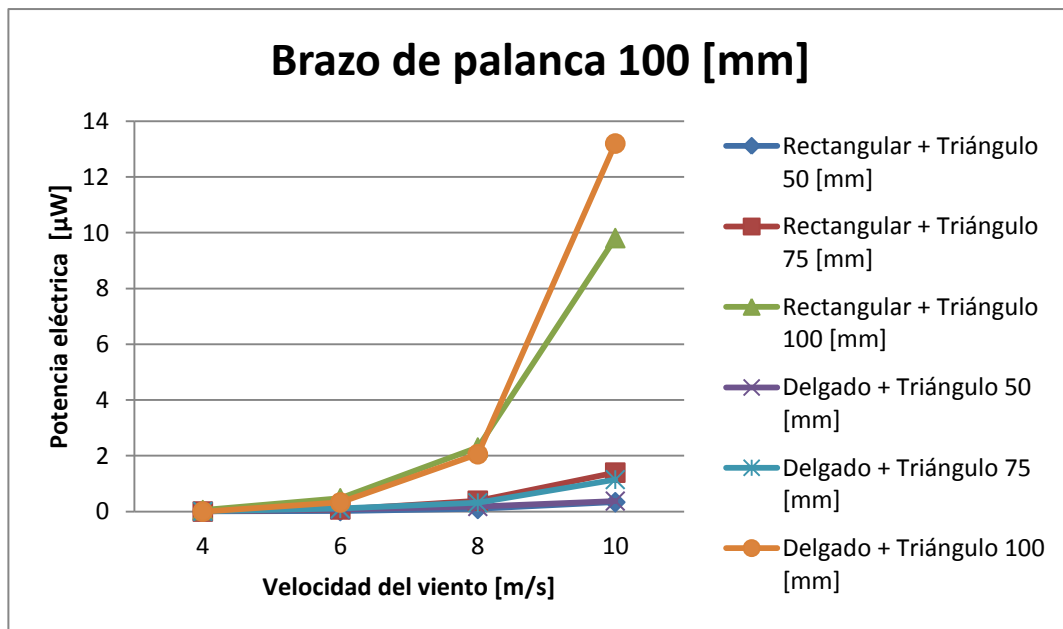


Fig. 5.2.2.2 Comparación de la potencia eléctrica obtenida para los diferentes arreglos de brazos de palanca de 100 [mm]

Tabla 5.2.2.10

Resultados obtenidos para el brazo de palanca rectangular de 150 [mm] hecho con Alucobond®.

| Va [m/s]                  | Vp [m/s] | Deformación piezoeléctrico [m] | Voltaje Promedio [V] | Área efectiva [m <sup>2</sup> ] | Potencia del viento [W] | Potencia extraída por el P-L [W] | Coficiente de potencia |
|---------------------------|----------|--------------------------------|----------------------|---------------------------------|-------------------------|----------------------------------|------------------------|
| <b>Triángulo 50 [mm]</b>  |          |                                |                      |                                 |                         |                                  |                        |
| 4                         | 3.255    | 0.430 E-6                      | 0.072                | 0.043 E-6                       | 1.247 E-6               | 0.382 E-6                        | 0.3064                 |
| 6                         | 5.789    | 2.187 E-6                      | 0.366                | 0.219 E-6                       | 21.40 E-6               | 1.453 E-6                        | 0.0679                 |
| 8                         | 6.975    | 4.219 E-6                      | 0.706                | 0.422 E-6                       | 97.84 E-6               | 21.96 E-6                        | 0.2245                 |
| 10                        | 8.187    | 8.127 E-6                      | 1.360                | 0.813 E-6                       | 368.1 E-6               | 110.4 E-6                        | 0.2998                 |
| <b>Triángulo 75 [mm]</b>  |          |                                |                      |                                 |                         |                                  |                        |
| 4                         | 3.449    | 1.888 E-6                      | 0.260                | 0.283 E-6                       | 8.208 E-6               | 1.961 E-6                        | 0.2389                 |
| 6                         | 5.199    | 4.748 E-6                      | 0.654                | 0.712 E-6                       | 69.68 E-6               | 16.20 E-6                        | 0.2325                 |
| 8                         | 6.738    | 6.912 E-6                      | 0.952                | 1.037 E-6                       | 240.0 E-6               | 64.36 E-6                        | 0.2677                 |
| 10                        | 8.253    | 11.69 E-6                      | 1.610                | 1.753 E-6                       | 794.2 E-6               | 231.1 E-6                        | 0.2910                 |
| <b>Triángulo 100 [mm]</b> |          |                                |                      |                                 |                         |                                  |                        |
| 4                         | 3.602    | 4.838 E-6                      | 0.558                | 0.968 E-6                       | 28.05 E-6               | 5.040 E-6                        | 0.1797                 |
| 6                         | 4.159    | 11.53 E-6                      | 1.330                | 2.306 E-6                       | 225.6 E-6               | 99.24 E-6                        | 0.4398                 |
| 8                         | 6.576    | 23.88 E-6                      | 2.754                | 4.775 E-6                       | 1.107 E-3               | 327.2 E-6                        | 0.2955                 |
| 10                        | 8.318    | 50.63 E-6                      | 5.840                | 10.13 E-6                       | 4.587 E-3               | 1.294 E-3                        | 0.2822                 |

Tabla 5.2.2.11

Resultados obtenidos para el brazo de palanca delgado de 150 [mm] hecho con Alucobond®.

| Va [m/s]                  | Vp [m/s] | Deformación piezoeléctrico [m] | Voltaje Promedio [V] | Área efectiva [m <sup>2</sup> ] | Potencia del viento [W] | Potencia extraída por el P-L [W] | Coficiente de potencia |
|---------------------------|----------|--------------------------------|----------------------|---------------------------------|-------------------------|----------------------------------|------------------------|
| <b>Triángulo 50 [mm]</b>  |          |                                |                      |                                 |                         |                                  |                        |
| 4                         | 3.288    | 0.765 E-6                      | 0.128                | 0.077 E-6                       | 2.217 E-6               | 0.655 E-6                        | 0.2955                 |
| 6                         | 5.094    | 1.769 E-6                      | 0.296                | 0.177 E-6                       | 17.31 E-6               | 4.467 E-6                        | 0.2581                 |
| 8                         | 6.738    | 4.087 E-6                      | 0.684                | 0.409 E-6                       | 94.79 E-6               | 25.37 E-6                        | 0.2677                 |
| 10                        | 8.318    | 5.844 E-6                      | 0.978                | 0.584 E-6                       | 264.7 E-6               | 74.70 E-6                        | 0.2822                 |
| <b>Triángulo 75 [mm]</b>  |          |                                |                      |                                 |                         |                                  |                        |
| 4                         | 3.288    | 1.321 E-6                      | 0.182                | 0.188 E-6                       | 5.746 E-6               | 1.698 E-6                        | 0.2955                 |
| 6                         | 5.302    | 4.313 E-6                      | 0.594                | 0.647 E-6                       | 63.29 E-6               | 13.06 E-6                        | 0.2064                 |
| 8                         | 6.576    | 9.627 E-6                      | 1.326                | 1.444 E-6                       | 334.9 E-6               | 98.95 E-6                        | 0.2955                 |
| 10                        | 8.318    | 17.57 E-6                      | 2.420                | 2.635 E-6                       | 1.194 E-3               | 336.9 E-6                        | 0.2822                 |
| <b>Triángulo 100 [mm]</b> |          |                                |                      |                                 |                         |                                  |                        |
| 4                         | 3.602    | 5.896 E-6                      | 0.680                | 1.179 E-6                       | 34.18 E-6               | 6.142 E-6                        | 0.1797                 |
| 6                         | 5.094    | 21.33 E-6                      | 2.460                | 4.266 E-6                       | 417.3 E-6               | 107.7 E-6                        | 0.2581                 |
| 8                         | 6.576    | 27.92 E-6                      | 3.220                | 5.584 E-6                       | 1.295 E-3               | 382.6 E-6                        | 0.2955                 |
| 10                        | 8.447    | 53.23 E-6                      | 6.140                | 10.65 E-6                       | 4.823 E-3               | 1.274 E-3                        | 0.2642                 |

Los resultados de forma gráfica se pueden observar en la siguiente figura, la Fig. 5.2.2.3.

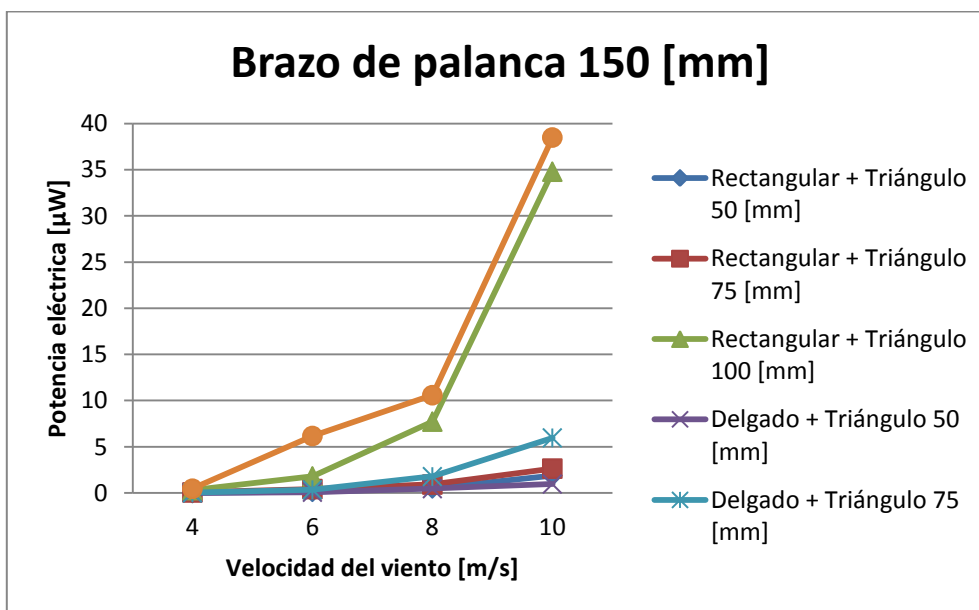


Fig. 5.2.2.3 Comparación de la potencia eléctrica obtenida para los diferentes arreglos de brazos de palanca de 150 [mm].

Tabla 5.2.2.12

Resultados obtenidos para el brazo de palanca rectangular de 170 [mm] hecho con Alucobond®.

| Va [m/s]                  | Vp [m/s] | Deformación piezoeléctrico [m] | Voltaje Promedio [V] | Área efectiva [m <sup>2</sup> ] | Potencia del viento [W] | Potencia extraída por el P-L [W] | Coefficiente de potencia |
|---------------------------|----------|--------------------------------|----------------------|---------------------------------|-------------------------|----------------------------------|--------------------------|
| <b>Triángulo 50 [mm]</b>  |          |                                |                      |                                 |                         |                                  |                          |
| 4                         | 3.288    | 1.392 E-6                      | 0.270                | 0.139 E-6                       | 4.034 E-6               | 1.192 E-6                        | 0.2955                   |
| 6                         | 4.650    | 4.224 E-6                      | 0.792                | 0.422 E-6                       | 41.33 E-6               | 14.65 E-6                        | 0.3544                   |
| 8                         | 6.576    | 8.644 E-6                      | 1.520                | 0.864 E-6                       | 200.5 E-6               | 59.23 E-6                        | 0.2955                   |
| 10                        | 8.187    | 11.97 E-6                      | 2.048                | 1.197 E-6                       | 542.3 E-6               | 162.6 E-6                        | 0.2998                   |
| <b>Triángulo 75 [mm]</b>  |          |                                |                      |                                 |                         |                                  |                          |
| 4                         | 3.499    | 1.960 E-6                      | 0.362                | 0.294 E-6                       | 8.525 E-6               | 2.036 E-6                        | 0.2389                   |
| 6                         | 5.094    | 8.261 E-6                      | 1.174                | 1.239 E-6                       | 121.2 E-6               | 31.29 E-6                        | 0.2581                   |
| 8                         | 6.576    | 17.78 E-6                      | 2.524                | 2.667 E-6                       | 618.5 E-6               | 182.7 E-6                        | 0.2955                   |
| 10                        | 8.187    | 30.38 E-6                      | 4.088                | 4.557 E-6                       | 2.064 E-3               | 618.9 E-6                        | 0.2998                   |
| <b>Triángulo 100 [mm]</b> |          |                                |                      |                                 |                         |                                  |                          |
| 4                         | 3.602    | 7.752 E-6                      | 1.164                | 1.550 E-6                       | 44.95 E-6               | 8.076 E-6                        | 0.1797                   |
| 6                         | 5.094    | 29.09 E-6                      | 3.390                | 5.818 E-6                       | 569.2 E-6               | 146.9 E-6                        | 0.2581                   |
| 8                         | 6.576    | 46.77 E-6                      | 6.930                | 9.354 E-6                       | 2.169 E-3               | 640.9 E-6                        | 0.2955                   |
| 10                        | 8.447    | 79.58 E-6                      | 10.78                | 15.92 E-6                       | 7.208 E-3               | 1.905 E-3                        | 0.2642                   |

Tabla 5.2.2.13

Resultados obtenidos para el brazo de palanca delgado de 170 [mm] hecho con Alucobond®.

| Va [m/s]                  | Vp [m/s] | Deformación piezoeléctrico [m] | Voltaje Promedio [V] | Área efectiva [m <sup>2</sup> ] | Potencia del viento [W] | Potencia extraída por el P-L [W] | Coefficiente de potencia |
|---------------------------|----------|--------------------------------|----------------------|---------------------------------|-------------------------|----------------------------------|--------------------------|
| <b>Triángulo 50 [mm]</b>  |          |                                |                      |                                 |                         |                                  |                          |
| 4                         | 3.199    | 0.937 E-6                      | 0.134                | 0.094 E-6                       | 2.717 E-6               | 0.948 E-6                        | 0.3488                   |
| 6                         | 5.199    | 2.238 E-6                      | 0.320                | 0.224 E-6                       | 21.89 E-6               | 5.092 E-6                        | 0.2325                   |
| 8                         | 6.410    | 6.784 E-6                      | 0.970                | 0.678 E-6                       | 157.3 E-6               | 50.72 E-6                        | 0.3224                   |
| 10                        | 8.054    | 11.18 E-6                      | 1.598                | 1.118 E-6                       | 506.2 E-6               | 160.5 E-6                        | 0.3171                   |
| <b>Triángulo 75 [mm]</b>  |          |                                |                      |                                 |                         |                                  |                          |
| 4                         | 3.499    | 2.044 E-6                      | 0.244                | 0.307 E-6                       | 8.889 E-6               | 2.123 E-6                        | 0.2389                   |
| 6                         | 5.403    | 5.379 E-6                      | 0.642                | 0.806 E-6                       | 78.94 E-6               | 14.18 E-6                        | 0.1797                   |
| 8                         | 6.576    | 13.71 E-6                      | 1.636                | 2.056 E-6                       | 476.8 E-6               | 140.9 E-6                        | 0.2955                   |
| 10                        | 8.699    | 27.82 E-6                      | 3.320                | 4.172 E-6                       | 1.890 E-3               | 429.8 E-6                        | 0.2274                   |
| <b>Triángulo 100 [mm]</b> |          |                                |                      |                                 |                         |                                  |                          |
| 4                         | 3.890    | 7.436 E-6                      | 0.752                | 1.487 E-6                       | 43.11 E-6               | 2.306 E-6                        | 0.0535                   |
| 6                         | 5.695    | 20.31 E-6                      | 2.054                | 4.062 E-6                       | 397.4 E-6               | 38.38 E-6                        | 0.0966                   |
| 8                         | 6.576    | 50.23 E-6                      | 5.080                | 10.05 E-6                       | 2.330 E-3               | 688.3 E-6                        | 0.2955                   |
| 10                        | 8.447    | 94.11 E-6                      | 9.518                | 18.82 E-6                       | 8.526 E-3               | 2.253 E-3                        | 0.2642                   |

Los resultados de forma gráfica se pueden observar en la siguiente figura, la Fig. 5.2.2.4.

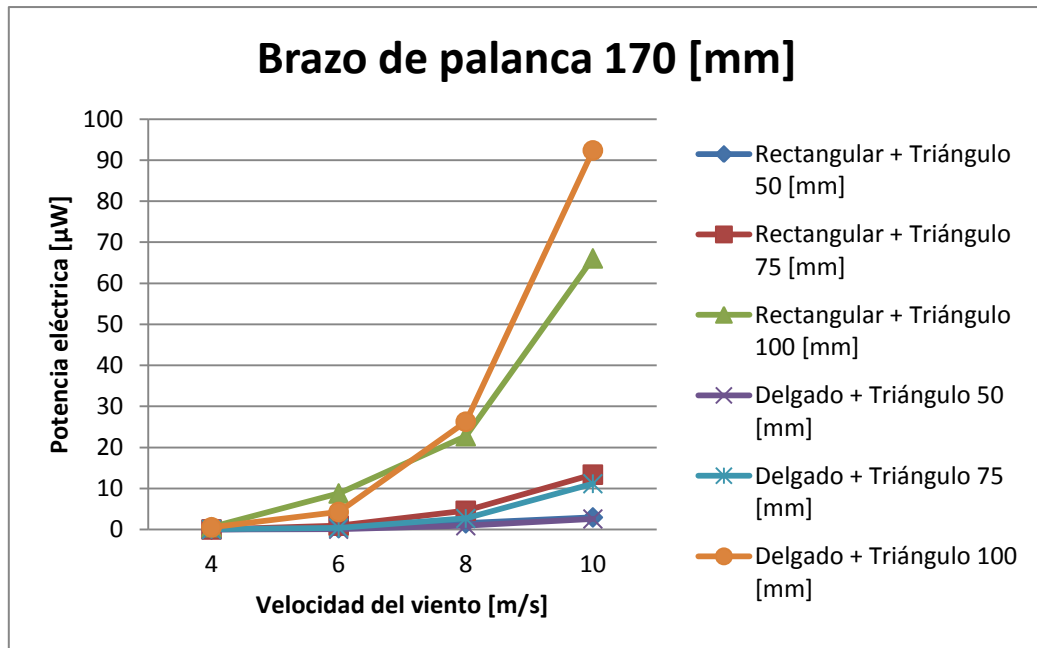


Fig. 5.2.2.4 Comparación de potencia eléctrica obtenida para los diferentes arreglos de brazos de palanca de 170 [mm].

Para conocer la influencia de la geometría triangular se decidió graficar la potencia eléctrica [ $\mu\text{W}$ ] obtenida para cada uno de los arreglos con brazos de palanca, utilizando en todos los casos la geometría triangular de 100 [mm], la cual presenta una mayor potencia eléctrica. Los resultados se muestran en las figuras siguientes, Fig. 5.2.2.5 para los brazos de palanca rectangulares y Fig. 5.2.2.6 para los brazos de palanca delgados.

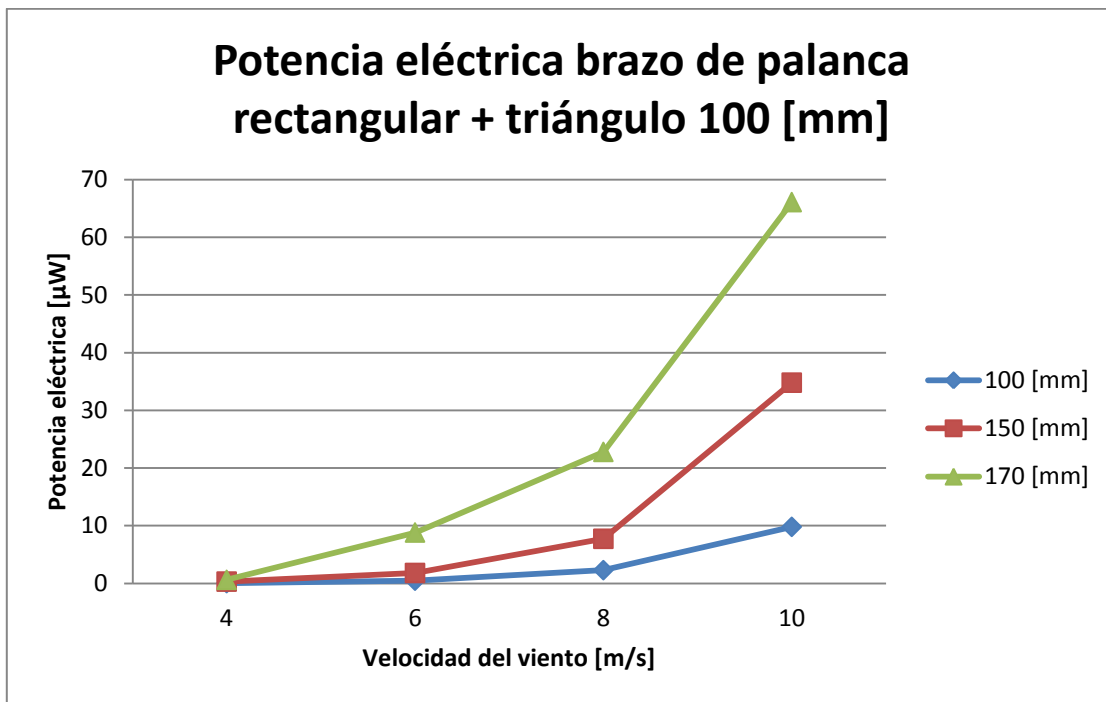


Fig. 5.2.2.5

Potencia eléctrica contra velocidad del viento anterior al dispositivo para los diferentes arreglos de Piezo-Leaf con brazo de palanca rectangular y punta triangular de 100 [mm].

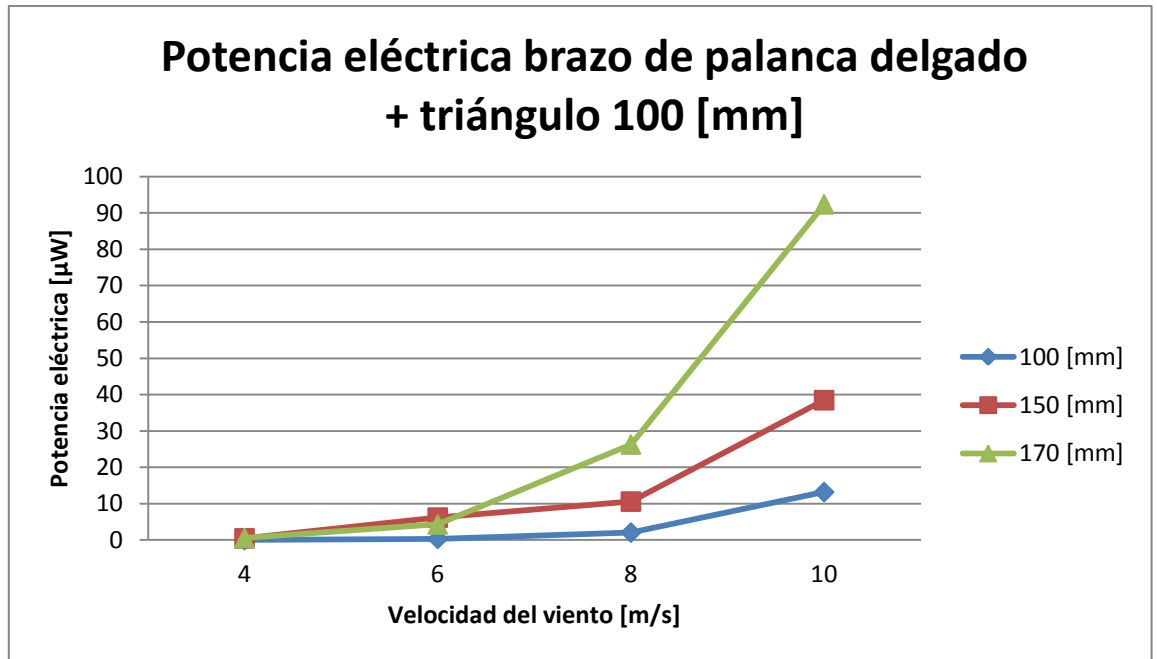


Fig. 5.2.2.6

Potencia eléctrica contra velocidad del viento anterior al dispositivo para los diferentes arreglos de Piezo-Leaf con brazo de palanca delgado y punta triangular de 100 [mm].

Considerando el funcionamiento promedio del dispositivo Piezo-Leaf, su rango de operación se encuentra ligeramente desplazado hacia la derecha con respecto a la zona más eficiente según el teorema de Betz, es decir que se encuentra por debajo de las condiciones óptimas del límite de Betz (59.26%) y en la curva de coeficiente de potencia se encuentra en la zona derecha. Esto se debe a que la cantidad de energía que es capaz de sustraer del viento el arreglo Piezo-Leaf no es tan considerable, por lo que no se acerca a la zona más óptima en donde 16/27 partes de la energía cinética son aprovechadas. En la siguiente gráfica se muestra la zona de funcionamiento promedio de este dispositivo.

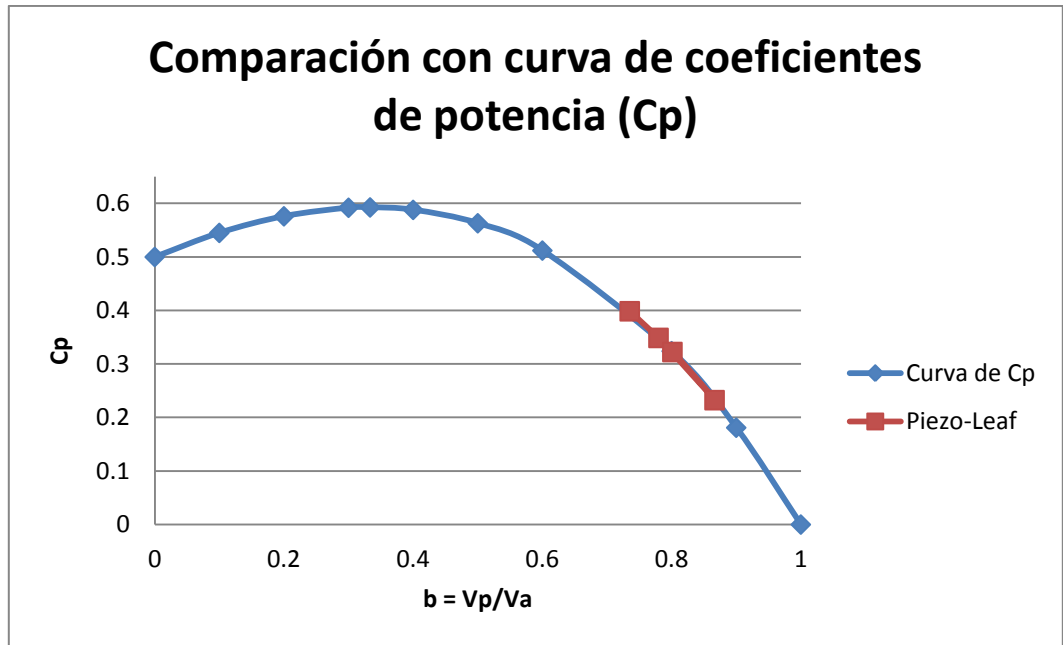


Fig. 5.2.2.7

Comparación del funcionamiento del Piezo-Leaf con la curva de coeficiente de potencia.

Eficiencia individual para diferentes ángulos de incidencia de la corriente de aire

La siguiente prueba se realizó para conocer el funcionamiento del arreglo Piezo-Leaf cuando la corriente de aire no incide de forma directa en la punta del dispositivo, zona para la que está diseñada esa zona y que presenta el mejor comportamiento del arreglo si el viento incide en ella.

Puesto que el viento no siempre vendrá en esa dirección, se modificó el ángulo de incidencia del mismo y se observaron los cambios en el funcionamiento del arreglo.

Para estas pruebas se emplearon los arreglos con el menor brazo de palanca, 100 [mm], tanto en su configuración delgada como en la rectangular, junto con la punta triangular más pequeña, la de 50 [mm] de base. Esto se debió a que las dimensiones del túnel de viento no nos permitieron probar todos los arreglos, ya que para ciertos ángulos (45°, 90° y 135°) las otras geometrías no cabían o quedaban demasiado cerca de las paredes del túnel de viento y por consiguiente los resultados eran alterados por la capa límite formada en las cercanías de éstas.

Los diferentes arreglos probados en los ángulos antes mencionados se muestran a continuación en la Figura 5.2.2.8.

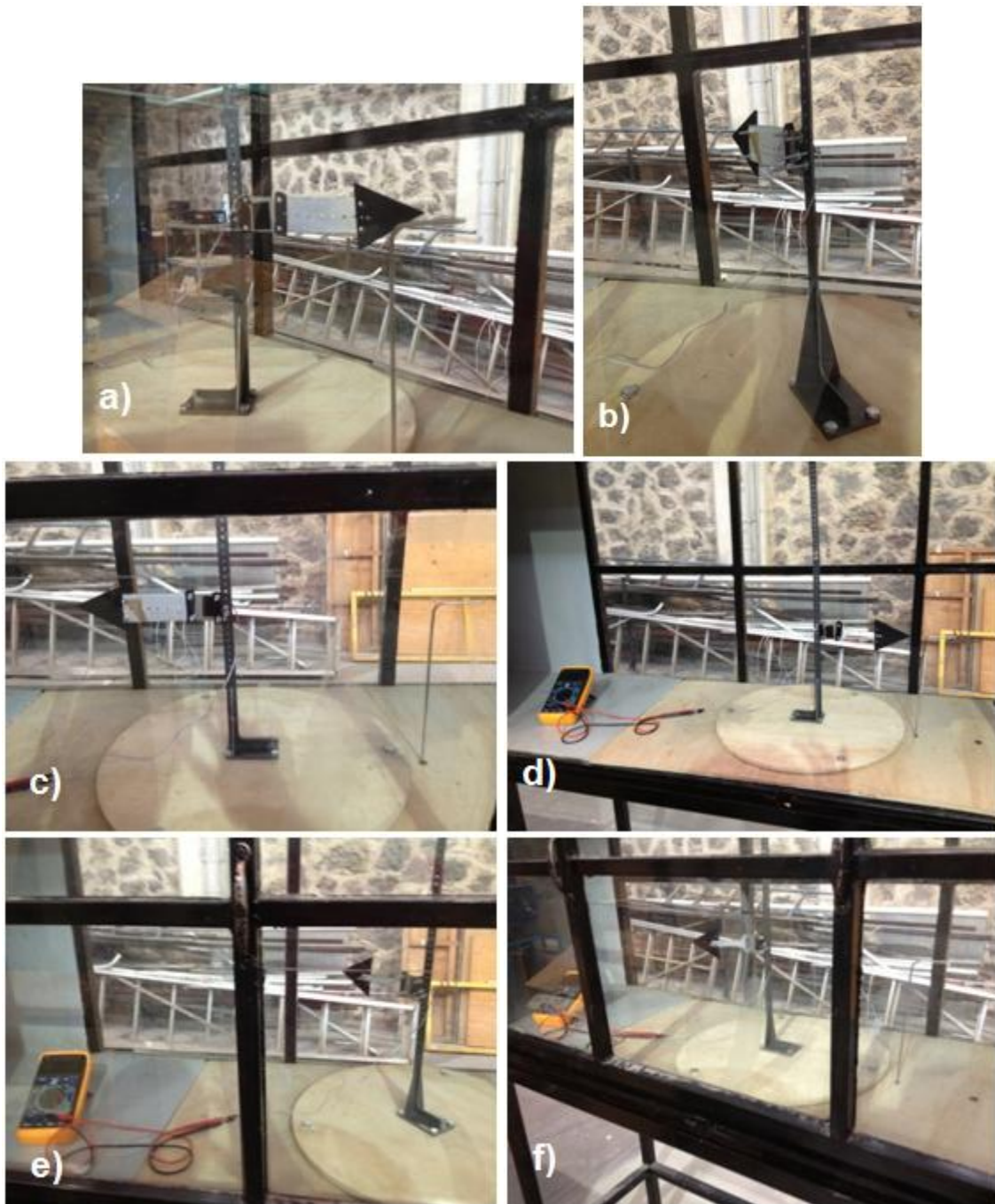


Fig. 5.2.2.8 Arreglos Piezo-Leaf probados para diferentes ángulos de incidencia de la corriente de viento. a) Brazo de palanca rectangular de 100 [mm] con punta triangular de 50 [mm] a 45°. b) Brazo de palanca rectangular de 100 [mm] con punta triangular de 50 [mm] a 135°. c) Brazo de palanca rectangular de 100 [mm] con punta triangular de 50 [mm] a 180°. d) Brazo de palanca delgado de 100 [mm] con punta triangular de 50 [mm] en posición original (0°). e) Brazo de palanca delgado de 100 [mm] con punta triangular de 50 [mm] a 135°. f) Brazo de palanca delgado de 100 [mm] con punta triangular de 50 [mm] a 180°.



Las pruebas se realizaron bajo las condiciones mostradas en la Tabla 5.2.2.14 y los resultados obtenidos se muestran en las tablas siguientes.

Tabla 5.2.2.14

Condiciones del aire en el laboratorio durante las pruebas del Piezo-Leaf para diferentes ángulos de incidencia.

|                                  |        |   |        |
|----------------------------------|--------|---|--------|
| <b>Temperatura</b><br>[K]        | 297.15 | <b>Presión</b><br>[KPa]                 | 77.000 |
| <b>R<sub>aire</sub></b> [J/kg*K] | 287.3  | <b>Densidad</b><br>[kg/m <sup>3</sup> ] | 0.9019 |

Tabla 5.2.2.15

Prueba de diferentes ángulos de incidencia para brazo de palanca rectangular de 100 [mm] y punta triangular de 50 [mm].

| Va [m/s]       | Vp [m/s] | Voltaje RMS Promedio [V] | Corriente eléctrica [mA] | Potencia eléctrica [mW] | Coficiente de Potencia | Desviación estándar |
|----------------|----------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|------------------------|---------------------|
| <b>0 [°]</b>   |          |                          |                          |                         |                        |                     |
| 4              | 3.119    | 0.057                    | 58.6 E-6                 | 3.36 E-6                | 0.3488                 | 0.011               |
| 6              | 5.199    | 0.154                    | 157 E-6                  | 24.2 E-6                | 0.2325                 | 0.020               |
| 8              | 6.410    | 0.312                    | 318 E-6                  | 99.3 E-6                | 0.3224                 | 0.025               |
| 10             | 7.352    | 0.576                    | 588 E-6                  | 339 E-6                 | 0.3986                 | 0.050               |
| <b>180 [°]</b> |          |                          |                          |                         |                        |                     |
| 4              | 3.449    | 0.091                    | 92.9 E-6                 | 8.45 E-6                | 0.2389                 | 0.043               |
| 6              | 4.650    | 0.134                    | 137 E-6                  | 18.3 E-6                | 0.3544                 | 0.038               |
| 8              | 6.739    | 0.276                    | 282 E-6                  | 77.7 E-6                | 0.2675                 | 0.116               |
| 10             | 7.919    | 0.592                    | 604 E-6                  | 358 E-6                 | 0.3341                 | 0.085               |

Tabla 5.2.2.16

Prueba de diferentes ángulos de incidencia para brazo de palanca delgado de 100 [mm] y punta triangular de 50 [mm].

| Va [m/s]       | Vp [m/s] | Voltaje RMS Promedio [V] | Corriente eléctrica [mA] | Potencia eléctrica [mW] | Coficiente de Potencia | Desviación estándar |
|----------------|----------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|------------------------|---------------------|
| <b>0 [°]</b>   |          |                          |                          |                         |                        |                     |
| 4              | 3.288    | 0.100                    | 102 E-6                  | 10.2 E-6                | 0.2955                 | 0.029               |
| 6              | 5.094    | 0.266                    | 271 E-6                  | 72.2 E-6                | 0.2581                 | 0.038               |
| 8              | 6.738    | 0.426                    | 434 E-6                  | 185 E-6                 | 0.2677                 | 0.089               |
| 10             | 8.318    | 0.610                    | 622 E-6                  | 380 E-6                 | 0.2822                 | 0.102               |
| <b>180 [°]</b> |          |                          |                          |                         |                        |                     |
| 4              | 3.449    | 0.066                    | 67.4 E-6                 | 4.45 E-6                | 0.1797                 | 0.040               |
| 6              | 4.650    | 0.134                    | 137 E-6                  | 18.3 E-6                | 0.2064                 | 0.038               |
| 8              | 6.739    | 0.326                    | 332 E-6                  | 109 E-6                 | 0.3224                 | 0.067               |
| 10             | 7.919    | 0.456                    | 465 E-6                  | 212 E-6                 | 0.3171                 | 0.091               |

Para las pruebas anteriores se calculó el área sobre la que actúa el viento dependiendo del ángulo de incidencia empleado, de forma que el área total de la parte del dispositivo que se encuentra de cara al viento, es la que se emplea para el cálculo de la potencia disponible en el aire. Puesto que para los ángulos de 45°, 90° y 180° se tiene un área en contra del viento mucho mayor que para los ángulos de 0° y 180°, la potencia disponible en el viento incrementa, pero el área de transducción de los dispositivos permanece constante, por lo que el coeficiente de potencia disminuye considerablemente, llegando a ser despreciable. Ver Fig. 5.2.2.1.12. Esto se debe a que el aire no está incidiendo en la dirección que los Piezo-Leaf pueden aprovechar de mejor manera la energía del viento y por esta razón se decidió no reportar en las tablas y en las gráficas.

Aunado a esto, la posición de la geometría del Piezo-Leaf para los ángulos de 45°, 90° y 135°, no es conveniente ya que el viento deforma el arreglo pero no permite que vuelva a su posición original, permaneciendo éste flexionado y por consiguiente sin generar potencia eléctrica debido a que el ciclo de deformación se interrumpe.

El cálculo del área se realizó de la siguiente manera:

$$A = \left( (l * b) + \left( \frac{b_t * h}{2} \right) \right) \sin \theta, \text{ dada en [m}^2\text{]} \quad (5.2.2.3)$$

Donde  $\theta$  cambia de acuerdo al ángulo existente entre la dirección de la corriente de viento y la orientación del dispositivo,  $l$  es la longitud de la parte rectangular del arreglo y  $b$  la base de la parte rectangular del arreglo, mientras que  $h$  es la altura de la parte triangular del arreglo y  $b_t$  la base de la parte triangular del arreglo. De esta forma se puede conocer a grandes rasgos el área sobre la que incide el viento en el dispositivo.

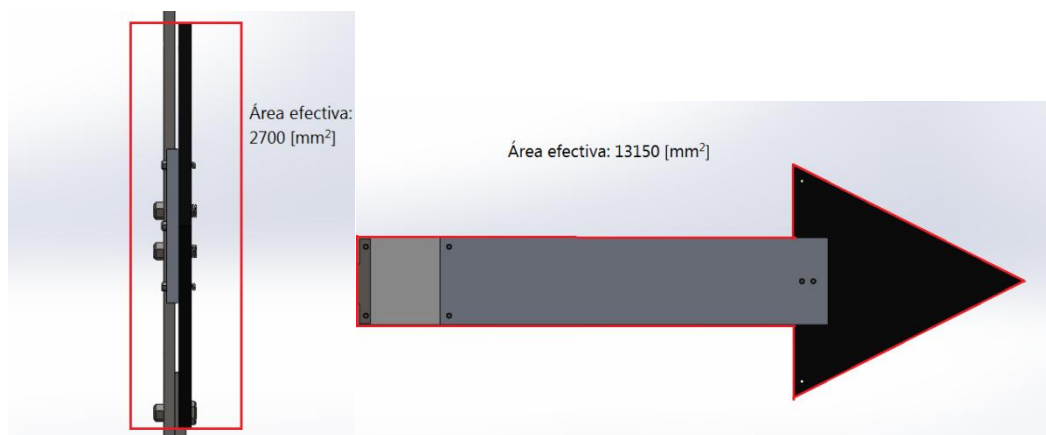


Fig. 5.2.2.1.9 Cambio en el área efectiva del viento para diferentes ángulos de incidencia. Izquierda: ángulo de incidencia 0°, derecha: ángulo de incidencia 90°.

Los resultados obtenidos anteriormente se encuentran graficados en las siguientes figuras de manera que sea más sencillo observar como el ángulo de incidencia afecta al coeficiente de potencia del dispositivo. Se graficaron únicamente los dos ángulos presentados en la tablas anteriores, es decir  $0^\circ$  y  $180^\circ$ , ya que el comportamiento del Piezo-Leaf es únicamente aceptable cuando el viento incide en una dirección, si importar el sentido de la corriente de aire.

La razón por la que ocurre esto es que a pesar de que se sigue transduciendo energía eólica en energía eléctrica, aunque cabe mencionar una considerable disminución en dicha transducción, al cambiar el área sobre la que incide el viento con el ángulo, ésta se incrementa considerablemente para los ángulos de  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  y  $135^\circ$ , provocando que la proporción de energía disponible entre energía aprovechada disminuya de manera importante.

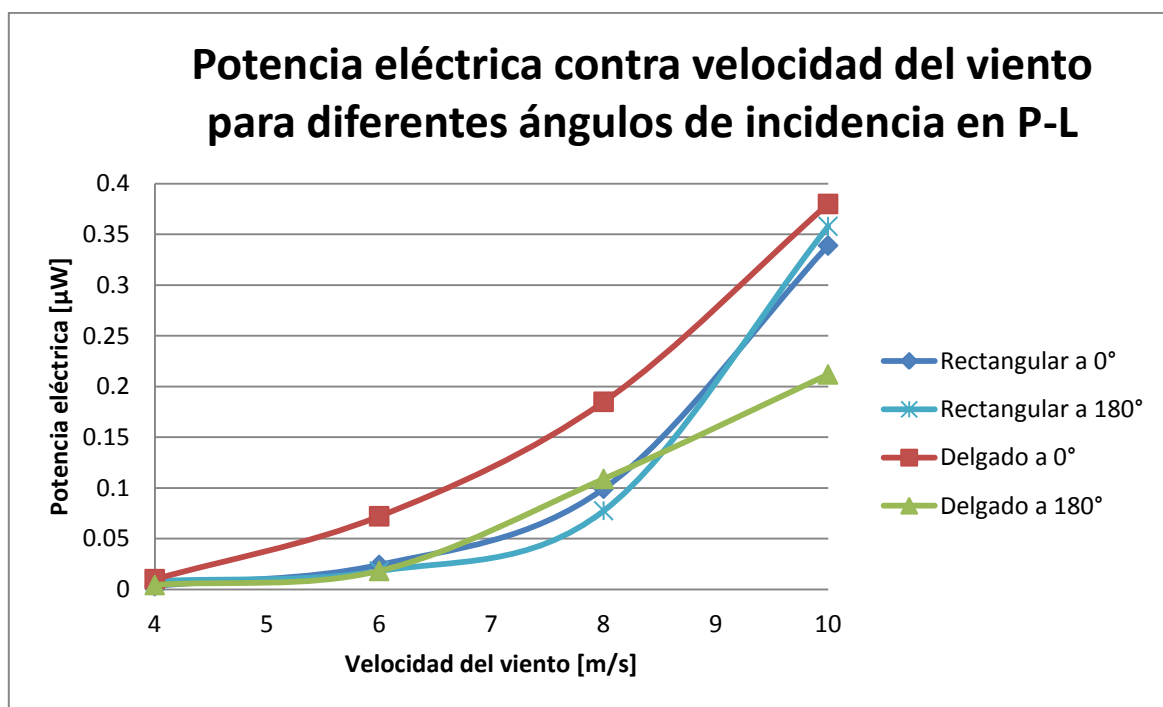


Fig. 5.2.2.10

Potencia eléctrica obtenida contra velocidad del viento del viento para diferentes ángulos de incidencia.

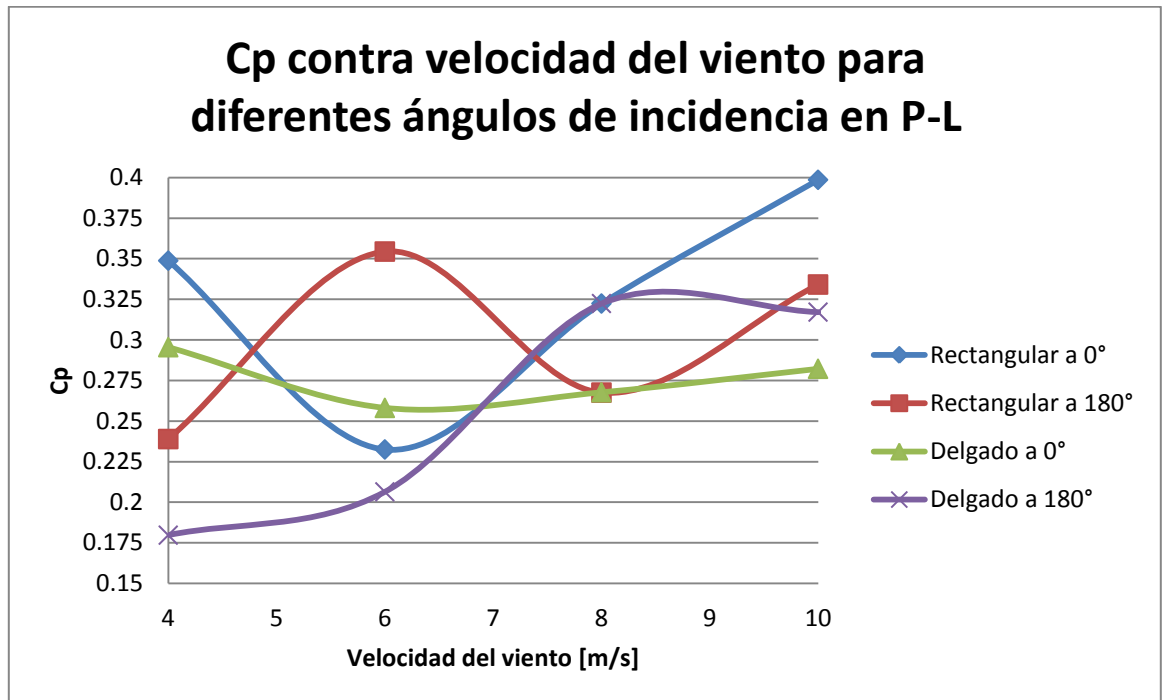


Fig. 5.2.2.11

Coeficiente de potencia contra velocidad del viento para diferentes ángulos de incidencia.

#### Eficiencia colectiva

La prueba de eficiencia colectiva del Piezo-Leaf, cuando se encuentra rodeado de otros dispositivos iguales, se realizó de forma vertical únicamente pues las dimensiones del área de trabajo del túnel de viento no permitieron la colocación de diferentes arreglos colocados horizontalmente. El arreglo estudiado se muestra en la Fig. 5.2.2.15 a continuación.

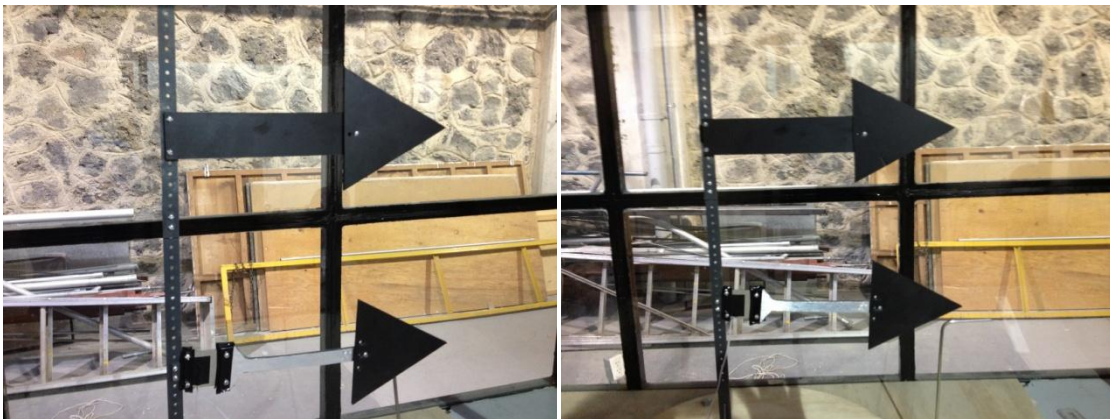


Fig. 5.2.2.12 Arreglo Piezo-Leaf para medir la influencia de otros dispositivos en el plano vertical.

Para esta prueba se decidió utilizar la configuración de brazo de palanca delgado de 170 [mm] con la figura triangular más grande, la de 100 [mm], debido a dos razones principales: en las pruebas anteriores fue el arreglo que mayor potencia eléctrica generaba, además de que al ser el arreglo físicamente más grande, junto con el de brazo rectangular de 170 [mm], se tendría una idea de la máxima densidad de dispositivos para las condiciones de funcionamiento del arreglo que más alteraciones en la corriente de aire causarían.

Las condiciones en las que se desarrolló esta prueba fueron las mostradas en la Tabla 5.2.2.17.

Tabla 5.2.2.17

Condiciones del aire en el laboratorio durante las pruebas de eficiencia colectiva del Piezo-Leaf.

|                                  |        |                                    |        |
|----------------------------------|--------|------------------------------------|--------|
| <b>Temperatura [K]</b>           | 296.65 | <b>Presión [KPa]</b>               | 77.148 |
| <b>R<sub>aire</sub> [J/kg*K]</b> | 287.3  | <b>Densidad [kg/m<sup>3</sup>]</b> | 0.9052 |

Tabla 5.2.2.18

Resultados obtenidos de la prueba de eficiencia colectiva para el Piezo-Leaf.

| Va [m/s]                      | Vp [m/s] | Voltaje RMS Promedio [V] | Corriente eléctrica [mA] | Potencia eléctrica [mW] | Coefficiente de Potencia | Desviación estándar |
|-------------------------------|----------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------|
| <b>Arreglo único</b>          |          |                          |                          |                         |                          |                     |
| 4                             | 3.890    | 0.752                    | 767 E-6                  | 577 E-6                 | 0.0535                   | 0.074               |
| 6                             | 5.695    | 2.054                    | 2.10 E-3                 | 4.31 E-3                | 0.0966                   | 0.047               |
| 8                             | 6.576    | 5.080                    | 5.18 E-3                 | 26.3 E-3                | 0.2955                   | 0.161               |
| 10                            | 8.447    | 9.518                    | 9.71 E-3                 | 92.4 E-3                | 0.2642                   | 0.292               |
| <b>Separación de 165 [mm]</b> |          |                          |                          |                         |                          |                     |
| 4                             | 3.449    | 0.390                    | 398 E-6                  | 155 E-6                 | 0.3151                   | 0.043               |
| 6                             | 4.650    | 1.617                    | 1.65 E-3                 | 2.67 E-3                | 0.2064                   | 0.204               |
| 8                             | 6.739    | 3.490                    | 3.56 E-3                 | 12.4 E-3                | 0.2097                   | 0.526               |
| 10                            | 7.919    | 6.140                    | 6.26 E-3                 | 38.5 E-3                | 0.2998                   | 0.493               |
| <b>Separación de 190 [mm]</b> |          |                          |                          |                         |                          |                     |
| 4                             | 3.449    | 0.333                    | 340 E-6                  | 113 E-6                 | 0.2389                   | 0.049               |
| 6                             | 4.650    | 1.137                    | 1.16 E-3                 | 1.32 E-3                | 0.1797                   | 0.331               |
| 8                             | 6.739    | 3.900                    | 3.98 E-3                 | 15.5 E-3                | 0.2390                   | 0.735               |
| 10                            | 7.919    | 6.833                    | 6.97 E-3                 | 47.6 E-3                | 0.2998                   | 0.340               |
| <b>Separación de 215 [mm]</b> |          |                          |                          |                         |                          |                     |
| 4                             | 3.449    | 0.637                    | 650 E-6                  | 414 E-6                 | 0.1797                   | 0.066               |
| 6                             | 4.650    | 2.030                    | 2.07 E-3                 | 4.21 E-3                | 0.1525                   | 0.175               |
| 8                             | 6.739    | 5.176                    | 5.28 E-3                 | 27.3 E-3                | 0.2535                   | 0.330               |
| 10                            | 7.919    | 9.333                    | 9.52 E-3                 | 88.9 E-3                | 0.2460                   | 0.563               |

En este caso la potencia eléctrica generada fue la que nos permitió determinar cuál debía de ser la distancia mínima entre dispositivos, ya que debido a la turbulencia generada por los dispositivos adyacentes, las mediciones de velocidades antes y después del Piezo-Leaf estudiado nos arrojaban valores difíciles de interpretar. Estas alteraciones en la corriente de aire como consecuencia de dispositivos cercanos generaron valores de coeficientes de potencia más altos de lo real debido a la caída de presiones que dichos arreglos provocaban. Es por esta razón que en esta prueba dicho coeficiente no se empleó como factor decisivo y se puede decir que la distancia mínima que permite el funcionamiento adecuado de varios arreglos es de 215 [mm] entre cada uno de ellos, esto únicamente en el plano vertical.

Los resultados se pueden observar gráficamente a continuación.

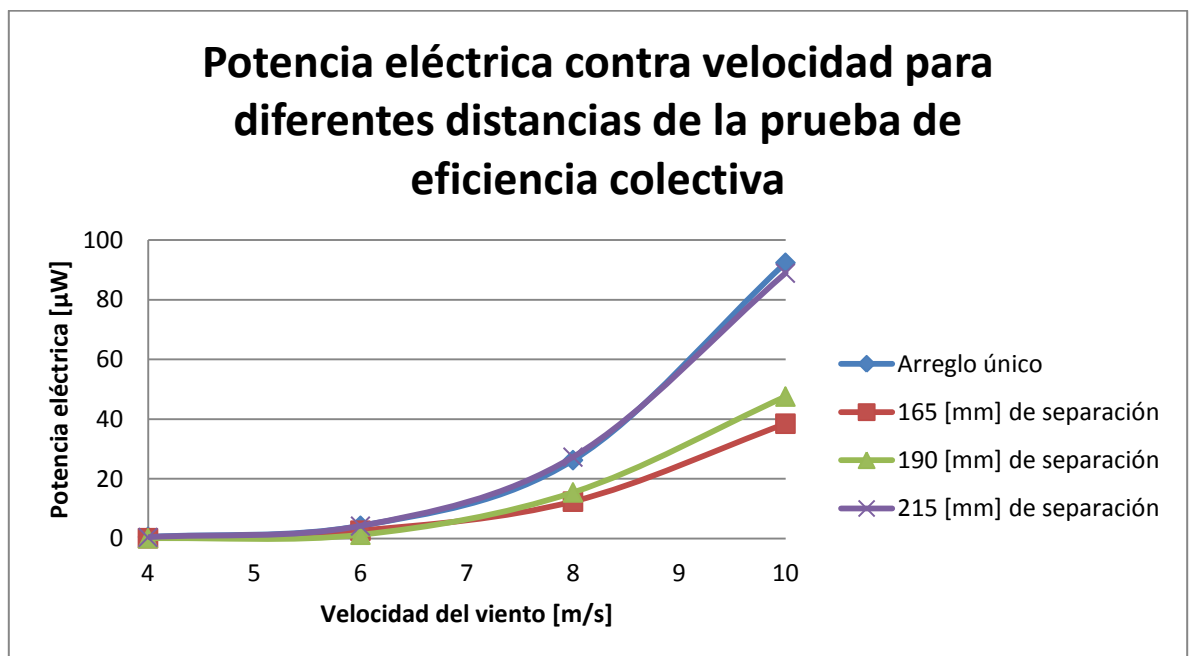


Fig. 5.2.2.13

Potencia eléctrica contra velocidad del viento para diferentes distancias entre dispositivos Piezo-Leaf.

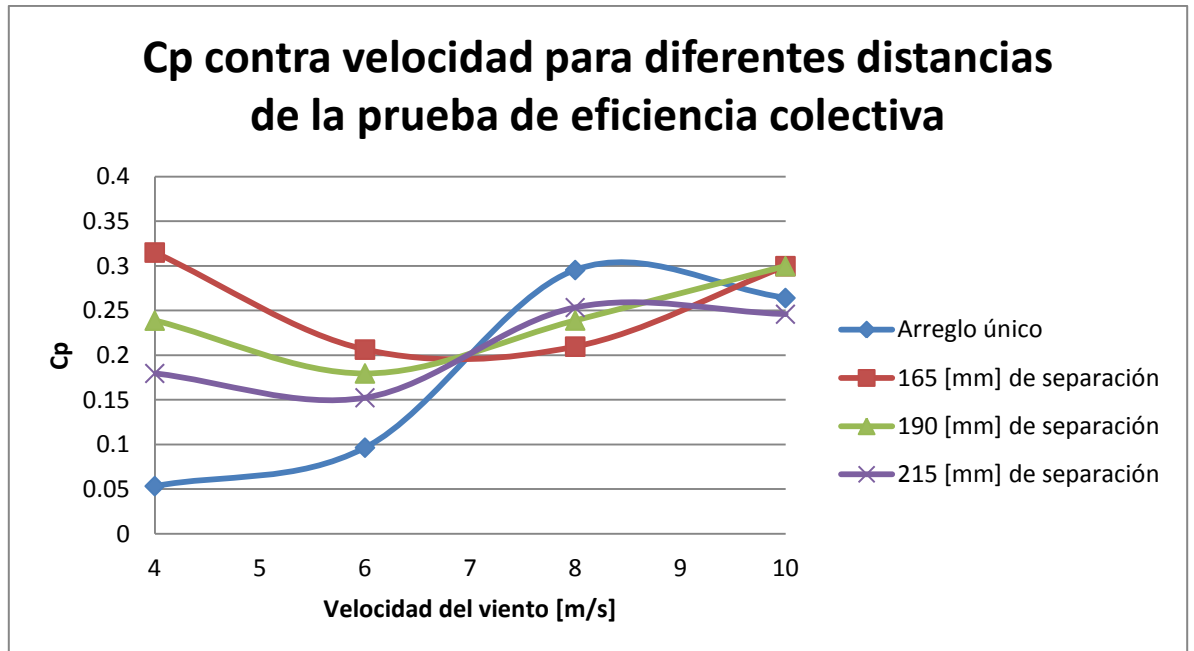


Fig. 5.2.2.14

Coefficiente de potencia contra velocidad del viento para diferentes distancias entre dispositivos Piezo-Leaf

### 5.2.3. Giro-Wind

Con la última configuración descrita en la sección 4.3.2 del Capítulo IV, se realizaron las pruebas antes mencionadas cambiando los brazos de palanca y la posición del cubo, poniéndolo como rombo de forma que el triángulo creó una asimetría con la cual comience el movimiento. Las siguientes pruebas se realizaron con las condiciones de aire en el laboratorio mostradas a continuación.

Tabla 5.2.3.1

Condiciones del aire en el laboratorio durante las pruebas realizadas al Giro-Wind.

|                                  |        |   |        |
|----------------------------------|--------|---|--------|
| <b>Temperatura</b><br>[K]        | 296.65 | <b>Presión</b><br>[KPa]                 | 77.148 |
| <b>R<sub>aire</sub></b> [J/kg*K] | 287.3  | <b>Densidad</b><br>[kg/m <sup>3</sup> ] | 0.9052 |

Los datos obtenidos de las pruebas con las distintas configuraciones fueron las siguientes:

La primera configuración probada fue la del cubo y con esto se llevó a cabo la prueba de eficiencia y se obtuvieron los datos mostrados en la Tabla 5.2.3.2.

Tabla 5.2.3.2

Voltajes obtenidos en la prueba de eficiencia individual del Giro-Wind para la configuración en cubo.

| Vanterior [m/s]                     | Vposterior [m/s] | Voltaje RMS Promedio [V] | Corriente eléctrica [mA] | Potencia eléctrica [mW] | Desviación estándar |
|-------------------------------------|------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|---------------------|
| <b>Brazo de palanca de 100 [mm]</b> |                  |                          |                          |                         |                     |
| 4                                   | 3.288            | 0.224                    | 229 E-6                  | 51.2 E-6                | 0.068               |
| 6                                   | 5.094            | 1.340                    | 1.36 E-3                 | 1.83 E-3                | 0.089               |
| 8                                   | 6.739            | 4.109                    | 4.19 E-3                 | 17.2 E-3                | 0.261               |
| 10                                  | 8.187            | 7.420                    | 7.57 E-3                 | 56.2 E-3                | 0.405               |
| <b>Brazo de palanca de 150 [mm]</b> |                  |                          |                          |                         |                     |
| 4                                   | 3.602            | 0.544                    | 555 E-6                  | 302 E-6                 | 0.336               |
| 6                                   | 4.650            | 1.304                    | 1.33 E-3                 | 1.73 E-3                | 0.089               |
| 8                                   | 6.576            | 5.640                    | 5.75 E-3                 | 32.5 E-3                | 0.102               |
| 10                                  | 8.574            | 8.574                    | 8.75 E-3                 | 75.0 E-3                | 0.561               |
| <b>Brazo de palanca de 170 [mm]</b> |                  |                          |                          |                         |                     |
| 4                                   | 3.449            | 0.790                    | 806 E-6                  | 637 E-6                 | 0.097               |
| 6                                   | 5.302            | 4.080                    | 4.16 E-3                 | 17.0 E-3                | 0.801               |
| 8                                   | 6.576            | 7.980                    | 8.14 E-3                 | 64.9 E-3                | 0.784               |
| 10                                  | 8.574            | 10.72                    | 10.9 E-3                 | 117 E-3                 | 1.010               |

En la siguiente gráfica se muestran los resultados de la Tabla 5.2.3.2.

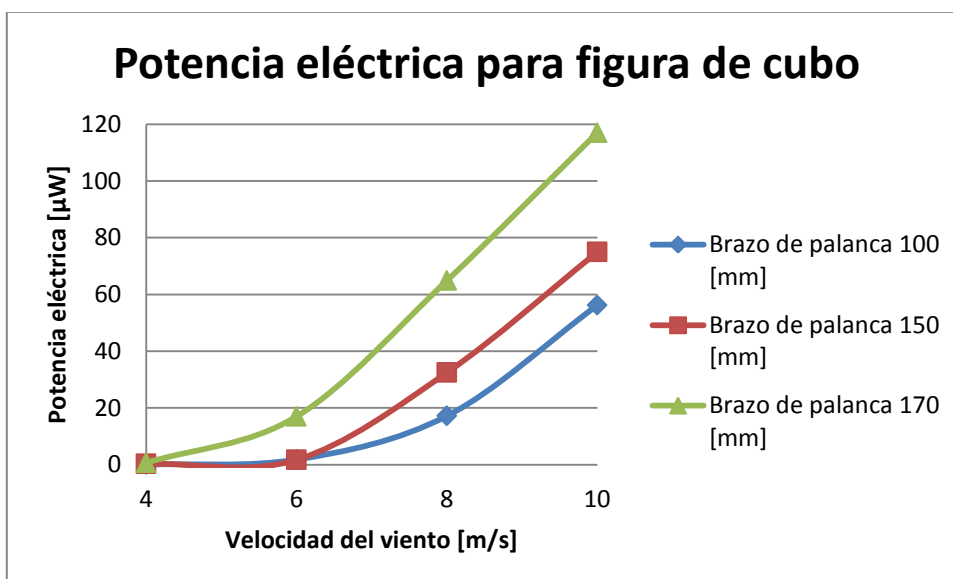


Fig. 5.2.3.1.

Potencia eléctrica contra velocidad del viento para diferentes longitudes de brazo de palanca en la configuración de cubo.



De la misma manera que para la prueba de la primera configuración, se realizaron las pruebas con la geometría en forma de rombo y con esto se llevó a cabo la prueba de eficiencia, obteniéndose los valores de la Tabla 5.2.3.3.

Tabla 5.2.3.3

Voltajes obtenidos en la prueba de eficiencia individual del Giro-Wind para la configuración en rombo.

| Vanterior<br>[m/s]                  | Vposterior<br>[m/s] | Voltaje<br>RMS<br>Promedio<br>[V] | Corriente<br>eléctrica<br>[mA] | Potencia<br>eléctrica<br>[mW] | Desviación<br>estándar |
|-------------------------------------|---------------------|-----------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|------------------------|
| <b>Brazo de palanca de 100 [mm]</b> |                     |                                   |                                |                               |                        |
| 4                                   | 3.119               | 0.184                             | 188 E-6                        | 34.6 E-6                      | 0.070                  |
| 6                                   | 4.877               | 0.463                             | 472 E-6                        | 219 E-6                       | 0.305                  |
| 8                                   | 6.739               | 5.120                             | 5.22 E-3                       | 26.7 E-3                      | 0.560                  |
| 10                                  | 8.318               | 7.200                             | 7.35 E-3                       | 52.9 E-3                      | 0.602                  |
| <b>Brazo de palanca de 150 [mm]</b> |                     |                                   |                                |                               |                        |
| 4                                   | 3.288               | 0.294                             | 300 E-6                        | 88.2 E-6                      | 0.189                  |
| 6                                   | 5.094               | 1.630                             | 1.66 E-3                       | 2.71 E-3                      | 0.570                  |
| 8                                   | 7.204               | 6.450                             | 6.58 E-3                       | 42.4 E-3                      | 0.360                  |
| 10                                  | 8.699               | 9.020                             | 9.20 E-3                       | 83.0 E-3                      | 1.089                  |
| <b>Brazo de palanca de 170 [mm]</b> |                     |                                   |                                |                               |                        |
| 4                                   | 3.288               | 0.357                             | 364 E-6                        | 130 E-6                       | 0.236                  |
| 6                                   | 5.302               | 0.958                             | 977 E-6                        | 937 E-6                       | 0.369                  |
| 8                                   | 7.204               | 8.650                             | 8.83 E-3                       | 76.3 E-3                      | 0.490                  |
| 10                                  | 8.823               | 12.63                             | 12.9 E-3                       | 163 E-3                       | 0.502                  |

A continuación se muestran los resultados de la Tabla 5.2.3.3.

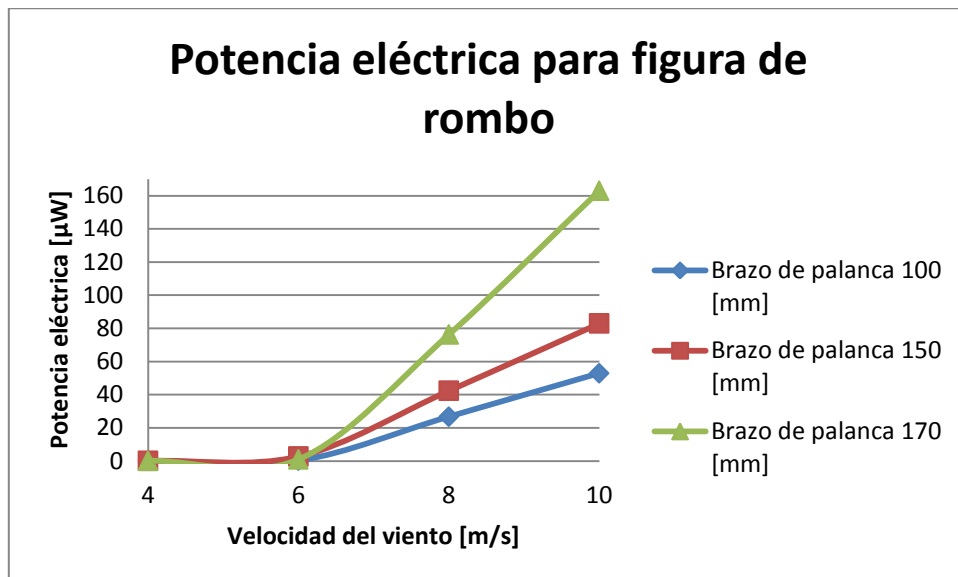


Fig. 5.2.3.2

Potencia eléctrica contra velocidad del viento para diferentes longitudes de brazo de palanca en la configuración de rombo.

Debido a que se trata del mismo piezoeléctrico que es empleado en el Piezo-Leaf, la deformación se calculó de la misma forma. Mientras que el área que se tomó es la del arreglo del cubo con un triángulo superpuesto, con la función de generar el giro del cubo. Al suponer el giro constante para el cálculo del área efectiva, se tiene una geometría como la mostrada en la Figura 5.2.3.3.

Asimismo el cálculo de la potencia del viento y de la potencia extraída por el dispositivo Giro-Wind, se calculó de la misma manera que para el Aeroflexor y el Piezo-Leaf, mediante las ecuaciones 2.1.2.23 y 2.1.2.24 respectivamente.

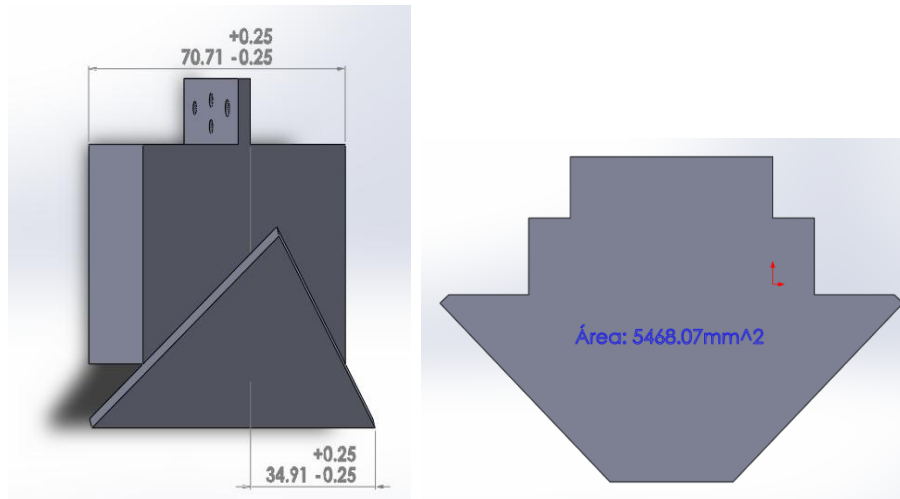


Fig. 5.2.3.3 Geometría del cubo con triángulo superpuesto empleada en el dispositivo Giro-Wind y que se utilizó para calcular el área efectiva de dicho dispositivo.

Los resultados obtenidos se muestran a continuación, en la Tabla 5.2.3.4.

Tabla 5.2.3.4

Resultados obtenidos en la prueba de eficiencia individual del Giro-Wind para la configuración en cubo.

| Va [m/s]                            | Vp [m/s] | Deformación piezoeléctrico [m] | Voltaje Promedio [V] | Área efectiva [m <sup>2</sup> ] | Potencia del viento [W] | Potencia extraída por el G-W [W] | Coficiente de potencia |
|-------------------------------------|----------|--------------------------------|----------------------|---------------------------------|-------------------------|----------------------------------|------------------------|
| <b>Brazo de palanca de 100 [mm]</b> |          |                                |                      |                                 |                         |                                  |                        |
| 4                                   | 3.288    | 1.335 E-6                      | 0.224                | 5.470E-3                        | 0.159                   | 0.047                            | 0.2983                 |
| 6                                   | 5.094    | 8.053 E-6                      | 1.340                | 5.470E-3                        | 0.537                   | 0.116                            | 0.2168                 |
| 8                                   | 6.739    | 24.69 E-6                      | 4.109                | 5.470E-3                        | 1.274                   | 0.245                            | 0.1923                 |
| 10                                  | 8.187    | 44.59 E-6                      | 7.420                | 5.470E-3                        | 2.488                   | 0.675                            | 0.2713                 |
| <b>Brazo de palanca de 150 [mm]</b> |          |                                |                      |                                 |                         |                                  |                        |
| 4                                   | 3.602    | 2.044 E-6                      | 0.544                | 5.470E-3                        | 0.159                   | 0.021                            | 0.1341                 |
| 6                                   | 4.650    | 5.379 E-6                      | 1.304                | 5.470E-3                        | 0.537                   | 0.160                            | 0.2971                 |
| 8                                   | 6.576    | 13.71 E-6                      | 5.640                | 5.470E-3                        | 1.274                   | 0.283                            | 0.2219                 |
| 10                                  | 8.574    | 27.82 E-6                      | 8.574                | 5.470E-3                        | 2.488                   | 0.383                            | 0.1539                 |
| <b>Brazo de palanca de 170 [mm]</b> |          |                                |                      |                                 |                         |                                  |                        |
| 4                                   | 3.449    | 7.436 E-6                      | 0.790                | 5.470E-3                        | 0.159                   | 0.028                            | 0.1748                 |
| 6                                   | 5.302    | 20.31 E-6                      | 4.080                | 5.470E-3                        | 0.537                   | 0.087                            | 0.1628                 |
| 8                                   | 6.576    | 50.23 E-6                      | 7.980                | 5.470E-3                        | 1.274                   | 0.326                            | 0.2560                 |
| 10                                  | 8.574    | 94.11 E-6                      | 10.72                | 5.470E-3                        | 2.488                   | 0.510                            | 0.2050                 |

El coeficiente de potencia de la configuración en cubo se muestra a continuación, en la Fig. 5.2.3.4.

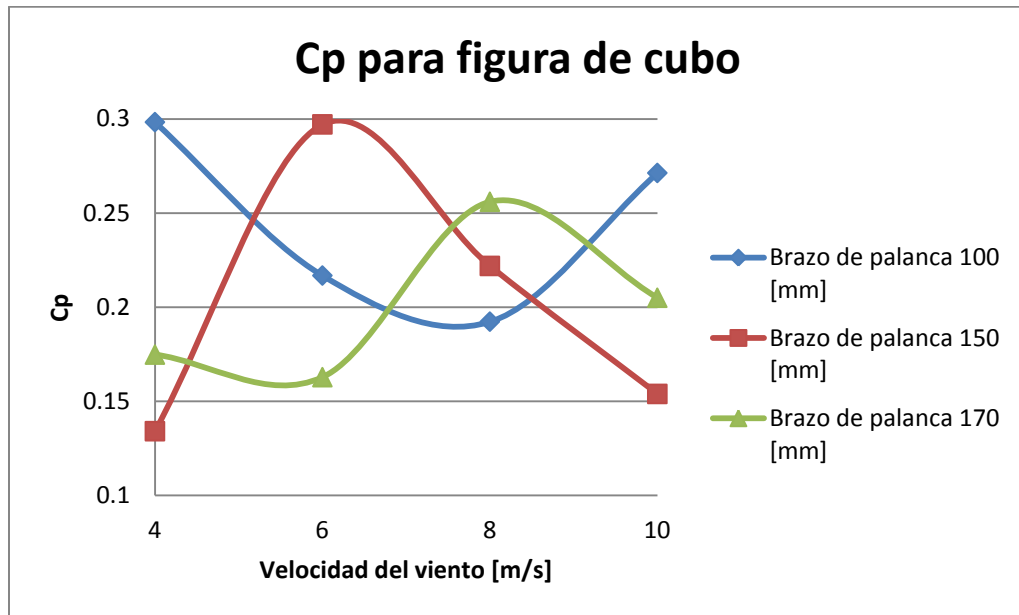


Fig. 5.2.3.4

Coefficiente de potencia contra velocidad del viento para la configuración en cubo.

Para el cálculo del área efectiva cuando la figura estaba colocada en la configuración de rombo, se consideró que el giro era uniforme por lo cual se formaba un sólido de revolución como el mostrado en la Fig. 5.2.3.5.

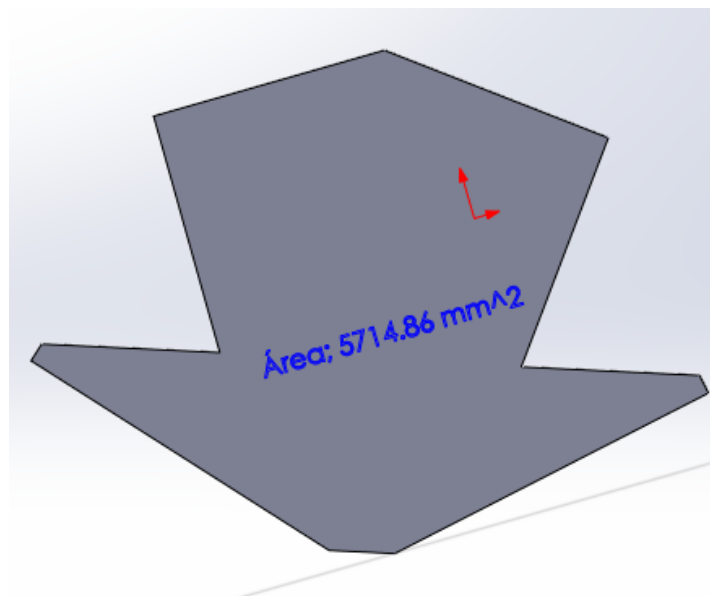


Fig. 5.2.3.5. Geometría formada por la revolución del arreglo Giro-Wind en configuración en rombo.

Los resultados obtenidos para esta última configuración se muestran a continuación, en la Tabla 5.2.3.5.

Tabla 5.2.3.5

Resultados obtenidos en la prueba de eficiencia individual del Giro-Wind para la configuración en rombo.

| Va<br>[m/s]                         | Vp<br>[m/s] | Deformación<br>piezoeléctrico<br>[m] | Voltaje<br>Promedio<br>[V] | Área<br>efectiva [m <sup>2</sup> ] | Potencia<br>del viento<br>[W] | Potencia<br>extraída<br>por el G-W<br>[W] | Coefficiente<br>de potencia |
|-------------------------------------|-------------|--------------------------------------|----------------------------|------------------------------------|-------------------------------|---|-----------------------------|
| <b>Brazo de palanca de 100 [mm]</b> |             |                                      |                            |                                    |                               |   |                             |
| 4                                   | 3.119       | 1.047 E-6                            | 0.184                      | 5.720E-3                           | 0.167                         | 0.051                                     | 0.3048                      |
| 6                                   | 4.877       | 2.635 E-6                            | 0.463                      | 5.720E-3                           | 0.562                         | 0.120                                     | 0.2126                      |
| 8                                   | 6.738       | 29.14 E-6                            | 5.120                      | 5.720E-3                           | 1.333                         | 0.265                                     | 0.1985                      |
| 10                                  | 8.318       | 40.98 E-6                            | 7.200                      | 5.720E-3                           | 2.603                         | 0.636                                     | 0.2442                      |
| <b>Brazo de palanca de 150 [mm]</b> |             |                                      |                            |                                    |                               |   |                             |
| 4                                   | 3.288       | 1.673 E-6                            | 0.294                      | 5.720E-3                           | 0.167                         | 0.042                                     | 0.2489                      |
| 6                                   | 5.094       | 9.273 E-6                            | 1.630                      | 5.720E-3                           | 0.562                         | 0.115                                     | 0.2043                      |
| 8                                   | 7.204       | 36.70 E-6                            | 6.450                      | 5.720E-3                           | 1.333                         | 0.161                                     | 0.1207                      |
| 10                                  | 8.699       | 51.34 E-6                            | 9.020                      | 5.720E-3                           | 2.603                         | 0.483                                     | 0.1858                      |
| <b>Brazo de palanca de 170 [mm]</b> |             |                                      |                            |                                    |                               |   |                             |
| 4                                   | 3.288       | 2.032 E-6                            | 0.357                      | 5.720E-3                           | 0.167                         | 0.041                                     | 0.2469                      |
| 6                                   | 5.302       | 5.451 E-6                            | 0.958                      | 5.720E-3                           | 0.562                         | 0.087                                     | 0.1550                      |
| 8                                   | 7.204       | 49.22 E-6                            | 8.650                      | 5.720E-3                           | 1.333                         | 0.190                                     | 0.1428                      |
| 10                                  | 8.823       | 71.87 E-6                            | 12.63                      | 5.720E-3                           | 2.603                         | 0.484                                     | 0.1857                      |

A continuación se muestra gráficamente la relación entre el coeficiente de potencia y la velocidad inicial del viento, en la Fig. 5.3.2.6.

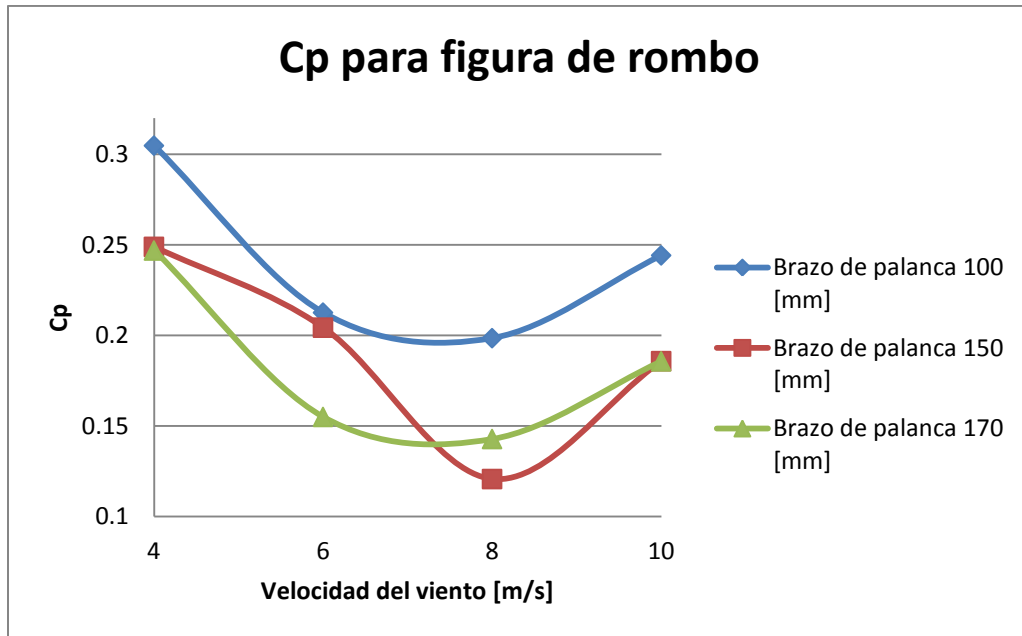


Fig. 5.2.3.6

Coefficiente de potencia contra velocidad del viento para la configuración en rombo.

Finalmente se muestra a continuación el funcionamiento promedio del dispositivo Giro-Wind con relación al límite de Betz, mostrándose al igual que con el dispositivo Piezo-Leaf un comportamiento en la zona derecha de la gráfica, zona en la que la extracción de energía cinética del viento no es tan significativa.

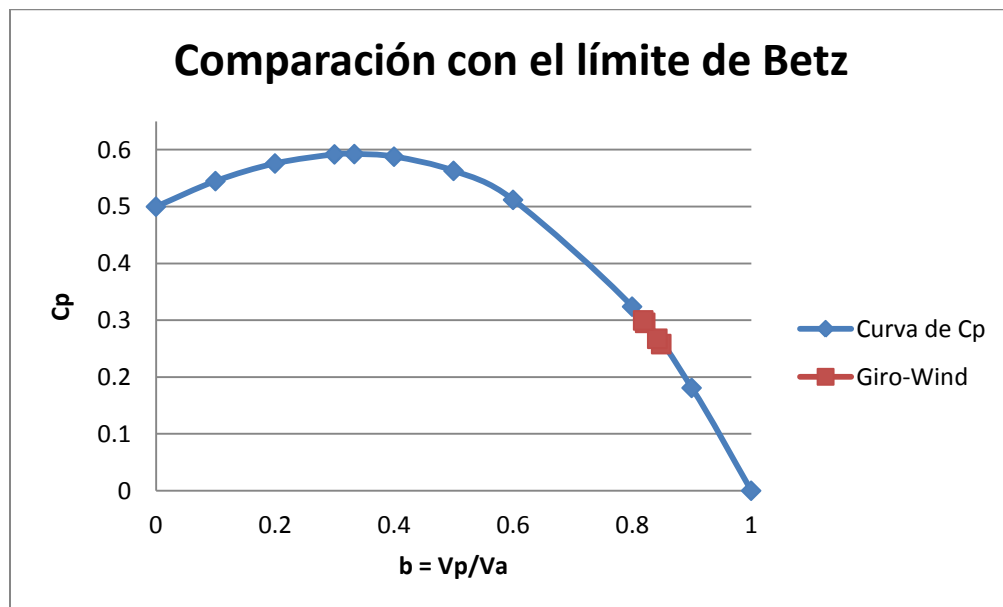


Fig. 5.2.3.7

Comparación del coeficiente de potencia del Giro-Wind con respecto a la curva de coeficiente de potencia.

### Eficiencia colectiva



Fig. 5.3.2.8. Arreglo de Giro-Wind para la prueba de eficiencia colectiva.

Al desarrollar el experimento de eficiencia colectiva de los dispositivos Giro-Wind, descrito previamente, se utilizó la configuración con brazo de palanca de 150 [mm], para la configuración en cubo. En la Fig. 5.2.3.8 se muestra el arreglo para esta prueba, de la cual se obtuvieron los siguientes datos, mostrados en la Tabla 5.2.3.6.

Tabla 5.2.3.6

Datos obtenidos de la prueba de eficiencia colectiva para el dispositivo Giro-Wind.

| Va<br>[m/s]                   | Vp<br>[m/s] | Voltaje RMS<br>Promedio<br>[V] | Corriente<br>eléctrica<br>[mA] | Potencia<br>eléctrica<br>[mW] | Coefficiente<br>de Potencia | Desviación<br>estándar |
|-------------------------------|-------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|------------------------|
| <b>Arreglo único</b>          |             |                                |                                |                               |                             |                        |
| 4                             | 3.602       | 0.544                          | 555 E-6                        | 302 E-6                       | 0.1341                      | 0.336                  |
| 6                             | 4.650       | 1.304                          | 1.33 E-3                       | 1.73 E-3                      | 0.2971                      | 0.089                  |
| 8                             | 6.576       | 5.640                          | 5.75 E-3                       | 32.5 E-3                      | 0.2219                      | 0.102                  |
| 10                            | 8.574       | 8.574                          | 8.75 E-3                       | 75.0 E-3                      | 0.1539                      | 0.561                  |
| <b>Separación de 100 [mm]</b> |             |                                |                                |                               |                             |                        |
| 4                             | 3.449       | 0.242                          | 247 E-6                        | 59.8 E-6                      | 0.1689                      | 0.042                  |
| 6                             | 4.877       | 1.160                          | 1.18 E-3                       | 1.37 E-3                      | 0.2389                      | 0.206                  |
| 8                             | 6.410       | 2.720                          | 2.78 E-3                       | 7.55 E-3                      | 0.2197                      | 0.605                  |
| 10                            | 8.187       | 5.100                          | 5.20 E-3                       | 26.5 E-3                      | 0.2798                      | 0.797                  |
| <b>Separación de 130 [mm]</b> |             |                                |                                |                               |                             |                        |
| 4                             | 3.288       | 0.510                          | 520 E-6                        | 266 E-6                       | 0.2389                      | 0.097                  |
| 6                             | 5.094       | 1.230                          | 1.26 E-3                       | 1.54 E-3                      | 0.1797                      | 0.331                  |
| 8                             | 6.897       | 3.940                          | 4.02 E-3                       | 15.8 E-3                      | 0.2067                      | 0.485                  |
| 10                            | 8.447       | 5.690                          | 5.81 E-3                       | 33.0 E-3                      | 0.2317                      | 0.690                  |
| <b>Separación de 160 [mm]</b> |             |                                |                                |                               |                             |                        |
| 4                             | 3.449       | 0.500                          | 510 E-6                        | 255 E-6                       | 0.1797                      | 0.069                  |
| 6                             | 4.650       | 1.350                          | 1.38 E-3                       | 1.86 E-3                      | 0.2798                      | 0.128                  |
| 8                             | 6.739       | 4.750                          | 4.85 E-3                       | 23.0 E-3                      | 0.2219                      | 0.530                  |
| 10                            | 7.919       | 7.580                          | 7.73 E-3                       | 58.6 E-3                      | 0.2998                      | 0.863                  |
| <b>Separación de 190 [mm]</b> |             |                                |                                |                               |                             |                        |
| 4                             | 3.449       | 0.612                          | 625 E-6                        | 382 E-6                       | 0.1797                      | 0.090                  |

|    |       |       |          |          |        |       |
|----|-------|-------|----------|----------|--------|-------|
| 6  | 4.650 | 1.302 | 1.33 E-3 | 1.73 E-3 | 0.2971 | 0.108 |
| 8  | 6.739 | 5.128 | 5.23 E-3 | 26.8 E-3 | 0.2219 | 0.560 |
| 10 | 7.919 | 8.780 | 8.96 E-3 | 78.7 E-3 | 0.2998 | 0.517 |

A continuación se muestran los resultados de forma gráfica, de manera que sea más sencillo observar la relación existente entre los parámetros de funcionamiento involucrados. En la Fig. 5.2.3.9 se muestran los resultados relacionados con la generación de la potencia eléctrica, mientras que en la Fig. 5.2.3.10 se muestran los relacionados con el coeficiente de potencia.

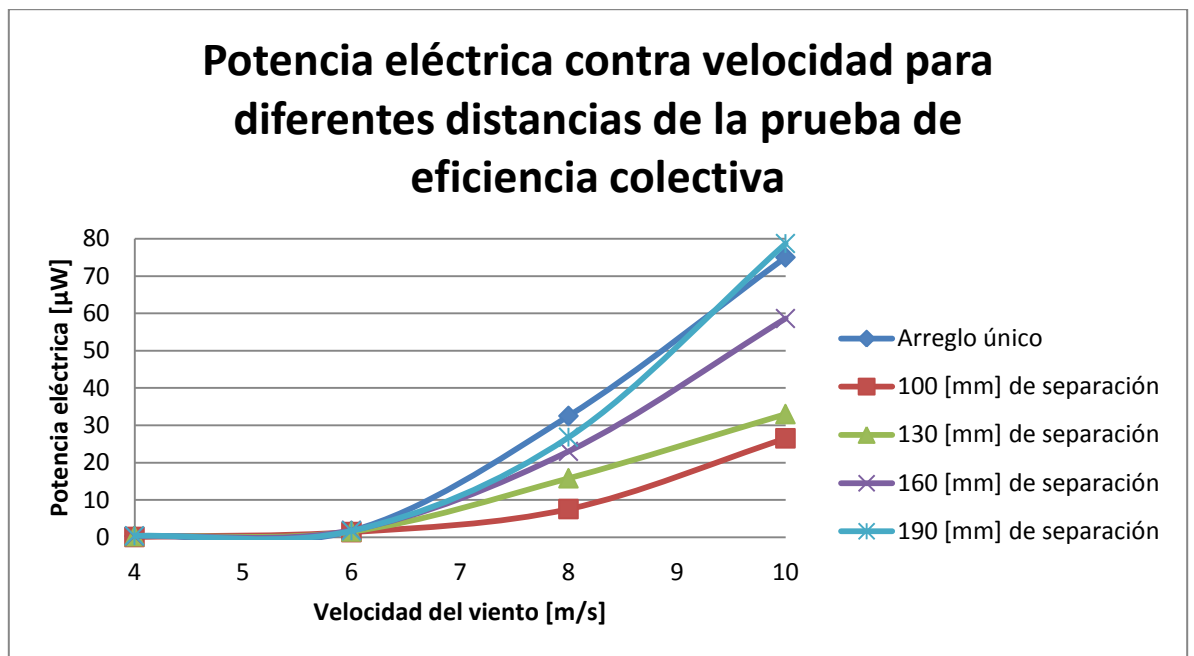


Fig. 5.2.3.9

Potencia eléctrica contra velocidad del viento para diferentes distancias entre dispositivos Giro-Wind.



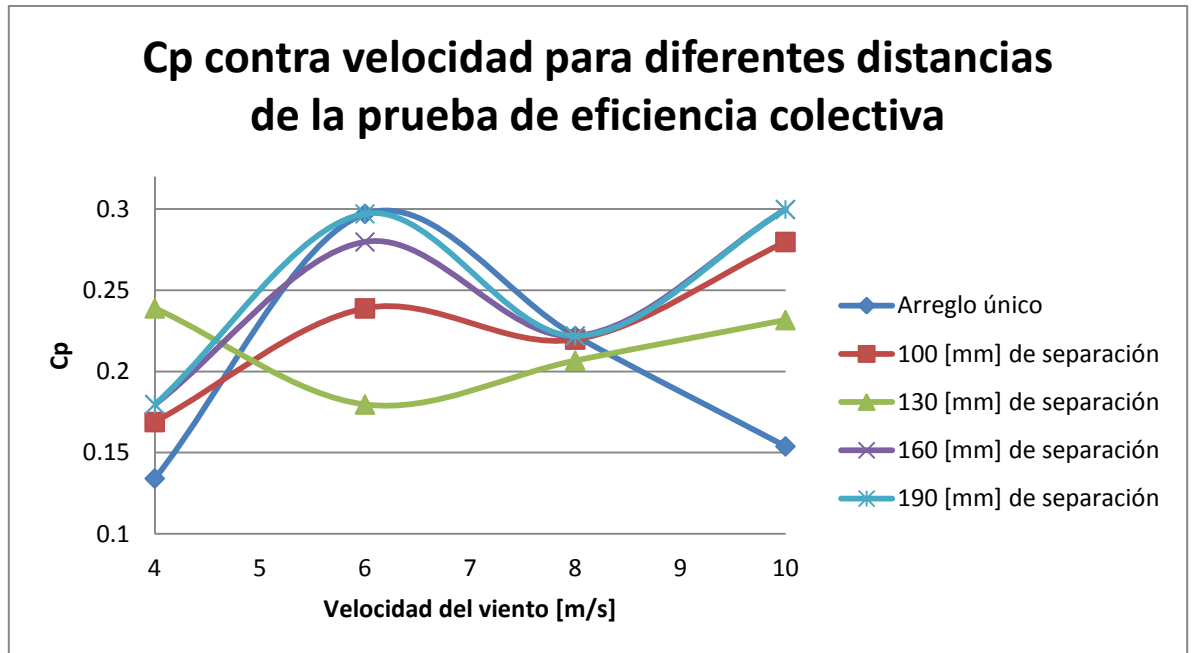


Fig. 5.2.3.10

Coefficiente de potencia contra velocidad del viento para diferentes distancias entre dispositivos Giro-Wind.

### 5.3. Comparación de los distintos dispositivos

A continuación se muestran las comparaciones pertinentes entre los tres dispositivos, así como su comparación en relación con el límite máximo de eficiencia mecánica, dictado por el teorema de Betz.

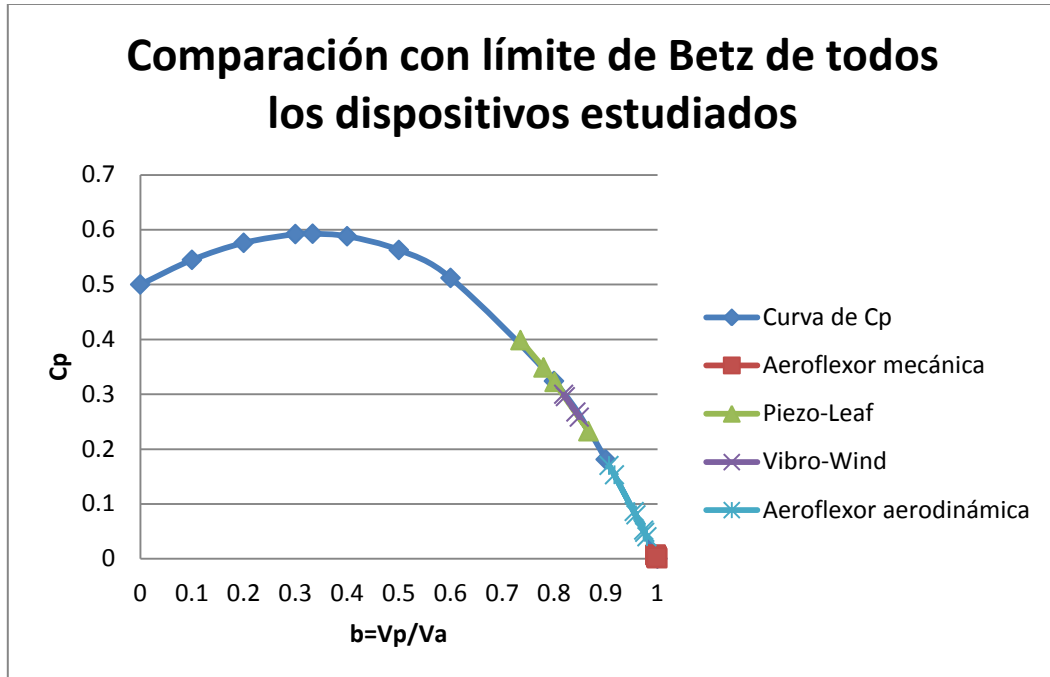


Fig. 5.3.1

Comparación del coeficiente de potencia de los dispositivos estudiados con la curva del coeficiente de potencia.

Para poder observar más claramente la zona en la que se encuentran funcionando los dispositivos, se presenta una ampliación del rango de  $b$  en el que se encuentran operando en la Fig. 5.3.2.

En esta ampliación se puede ver más fácilmente como todos los dispositivos tienen una menor extracción de energía cinética del viento de la que se consideraría más adecuada, pues la relación del factor de interferencia  $b$  (Velocidad posterior entre velocidad anterior al dispositivo), se encuentra en el rango de entre 0.725 a prácticamente 1, mientras que el límite de Betz se ubica en la zona en la que los dispositivos consiguen aprovechar 2/3 partes de la energía cinética del viento.

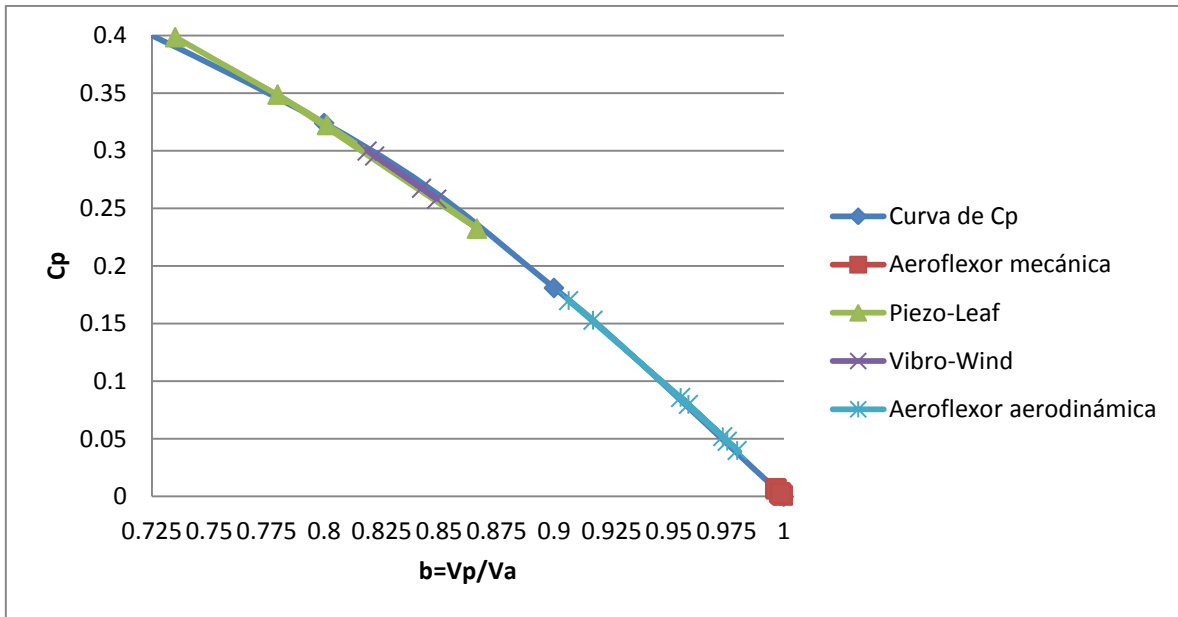


Fig. 5.3.2  
Ampliación de la zona en la que se encuentran los coeficientes de potencia de los dispositivos estudiados. Gráfica proveniente de la Fig. 5.3.1.

## 6. CAPÍTULO V – Conclusiones

*Debido a que ya ha finalizado la etapa experimental se exponen las observaciones obtenidas a lo largo de los anteriores capítulos, explicando los posibles errores en las mediciones y los comportamientos característicos de los dispositivos estudiados. Además se señalan los puntos fuertes y débiles de cada uno de los arreglos diseñados y las áreas de oportunidad para su mejoramiento.*

*Se presentan posibles mejoras o cambios a la etapa experimental y a la construcción de los dispositivos, así como recomendaciones en caso de que se realice un trabajo semejante en el futuro.*

### 6.1. Conclusiones

El funcionamiento de los tres dispositivos estudiados, Aeroflexor, Piezo-Leaf y Giro-Wind, presentan el problema de funcionar en un rango de  $b$ , relativamente alto. Es decir, que la velocidad en el extremo posterior de los arreglos es muy semejante a la velocidad anterior, es decir, la que incide sobre ellos. Esto significa que la transducción de energía cinética del viento en energía eléctrica o mecánica útil no está siendo muy aprovechada. Esto se nota claramente en las gráficas que muestran el límite de Betz, la curva de coeficientes de potencia y la zona de funcionamiento observada para cada dispositivo (Fig. 5.2.1.1.4, Fig. 5.2.2.10, Fig. 5.2.3.7, Fig. 5.3.1 y Fig. 5.3.2.). Por esta razón el coeficiente de potencia se encuentra bastante alejado del máximo posible mecánicamente, esto es ligeramente más notorio en el caso del Aeroflexor. Lo que nos permite concluir que los diseños de éste deben mejorarse de forma que extraigan una mayor cantidad de energía, principalmente a bajas velocidades, pues es para estas velocidades donde se pudieron observar mejores eficiencias, además de que serán las velocidades de viento a las que estos dispositivos funcionen la mayor parte del tiempo, en caso de hacerse comerciales.

Otro aspecto interesante fue la relación entre la potencia eléctrica y el coeficiente de potencia, pues si bien es cierto que los instrumentos de medición y las condiciones del túnel de viento no permitieron tener datos más precisos y con una mayor resolución, se observó que la relación antes mencionada pocas veces tuvo un comportamiento cuya correlación fuera especialmente estrecha. Esto se puede deber a errores en la medición y a que las características del piezoeléctrico empleado, en el caso del Piezo-Leaf y el Giro-Wind, no tiene un comportamiento lineal y por consiguiente la magnitud de la deformación no correspondía linealmente a la magnitud de la diferencia de potencial inducida, conforme se aumentaba la deformación.

Se observó que el tamaño del dispositivo, ya fuera el del ala usada en el Aeroflexor o la longitud de los brazos de palanca en el Giro-Wind y el Piezo-Leaf, presentaban una mayor diferencia de potencial y por consiguiente una mayor potencia eléctrica. Esto no se correspondió con el coeficiente de potencia, de forma que se puede concluir que estos dispositivos son mecánicamente más eficientes en tamaños menores. Pudiéndose

compensar entonces la menor obtención de potencia eléctrica mediante una mayor cantidad de dispositivos colocados en un espacio determinado. Esto nos permite inferir que al tener dispositivos más compactos se puede tener un mayor número de los mismos y esto finalmente permitirá tener una corriente eléctrica y un voltaje útiles de mayores magnitudes que si se tuviera una menor concentración de dispositivos pero de un tamaño mayor, aunque éstos últimos a primera impresión parezca que generan una mayor potencia eléctrica. La configuración con dispositivos de menor tamaño permite una mejor eficiencia aerodinámica a pesar de que puede significar también una mayor complejidad en lo que a las conexiones entre ellos se refiere.

La potencia eléctrica transducida por los dispositivos estudiados es muy pequeña por lo que su funcionamiento comercial o en aplicaciones que requieran de mayor potencia eléctrica requerirán del uso de arreglos con más de un dispositivo, independientemente de si se pretende emplear un Aeroflexor, un Piezo-Leaf o un Giro-Wind. Esto se debe a que en el caso de un solo Aeroflexor tanto la diferencia de voltaje como la corriente eléctrica son muy pequeñas, mientras que en el caso de los dispositivos con piezoeléctricos, aunque el voltaje obtenido es considerablemente alto, la corriente eléctrica es muy pequeña y por consiguiente la potencia eléctrica es difícil de aprovechar en alguna aplicación útil. Esto se comprobó al intentar rectificar las señales de corriente alterna recibidas, pues aunque en algunos casos el voltaje era suficientemente alto para poder ser rectificado, el puente rectificador y los diodos con los que se realiza dicha acción requerían de una corriente eléctrica de mayor magnitud. Debido a que ésta era muy reducida, a la salida del puente rectificador no se obtenía señal alguna, debido a que los diodos necesitaban de mayores magnitudes de corriente eléctrica para funcionar adecuadamente. Esto se puede solucionar si se conecta un arreglo de dispositivos en serie y entonces la densidad energética aumenta y la corriente eléctrica tal vez así sea suficiente para poder incluir una etapa de rectificación de la señal.

En lo referente a las consideraciones realizadas para la parte teórica y de los cálculos previos a la etapa experimental se debe expresar que se necesita un túnel de viento con características de funcionamiento más controlables de forma que realmente se pueda asegurar que las consideraciones realizadas son confiables y no alteran en gran medida los resultados teóricos que se obtuvieron. Asimismo una mayor exactitud, precisión y resolución de los instrumentos de medición también sería muy útil para conocer de mejor manera el funcionamiento de los dispositivos estudiados, pues algunas mediciones arrojaron valores fuera de los rangos esperados aún cuando se repitieron cuidadosamente. Estos factores pueden afectar negativamente los resultados y por consiguiente las conclusiones y la información que de ellos se puede inferir y obtener.

Pudimos observar que el Giro-Wind tiene un mejor rendimiento colectivo que los otros dos dispositivos, pues su funcionamiento se ve afectado en menor medida por los vórtices creados por otros objetos en su cercanía. Esto se debe al principio de funcionamiento empleado en nuestro arreglo, el cual además de ser multidireccional no es afectado en gran medida por las turbulencias y además al requerir de un cierto desequilibrio para tener un funcionamiento adecuado que le permita estar girando lo más posible, en algunos casos

hasta es conveniente que existan diversos cuerpos a su alrededor creando corrientes de viento con direcciones cambiantes.

En el caso del Piezo-Leaf la dirección de la corriente de viento es sumamente importante en relación a su coeficiente de potencia, por lo que su aplicación y adecuado funcionamiento queda restringido a que la corriente del aire incida en la zona diseñada para que eso ocurra. Esto limita enormemente su aplicación en condiciones reales pues el viento no incidirá siempre en la parte apropiada del arreglo. Aunado a lo anterior, su funcionamiento de forma colectiva presenta una distancia mínima entre dispositivos mayor que la que se necesitaría para el arreglo Giro-Wind, por lo que se tendría que comparar un área con la mayor densidad posible de Piezo-Leafs contra la misma área pero de Giro-Winds, Aeroflexors u otros dispositivos para poder conocer si dichas distancias entre dispositivos no afectan considerablemente su rendimiento frente a otras alternativas de obtención de energía eólica. Esto sin considerar que las pruebas de eficiencia colectiva llevadas a cabo en la etapa experimental no arrojan una información completa del funcionamiento de estos dispositivos cuando están rodeados de otros cuerpos, pues se hubiera necesitado un espacio mucho mayor para poder colocar dispositivos en todas las direcciones circundantes al que se está estudiando, para realmente conocer su funcionamiento bajo condiciones en las que a su alrededor la corriente de aire está siendo afectada por otros cuerpos.

Para el Aeroflexor se comprobó que la mayor parte de la energía que extrae del viento se aprovecha en su giro, sin embargo la transducción a energía aprovechable se lleva a cabo en la deformación longitudinal del ala, es decir, en una zona que no presenta un movimiento tan importante y por consiguiente tan potencialmente útil. Por esta razón y porque el motor eléctrico utilizado como generador no fue el más adecuado, al compararlo con los otros dispositivos, se concluye que el Aeroflexor en su configuración presentada anteriormente no es un dispositivo viable por la cantidad de energía eléctrica o mecánica que entrega. En las pruebas presentó muchas pérdidas de energía. En caso de aprovecharse el movimiento rotacional del arreglo del ala para transducir la energía eólica en otro tipo de energía, entonces podría llegar a ser un dispositivo sumamente interesante pues es el que tiene un movimiento más considerable.

Finalmente y enfocando los anteriores dispositivos en ciudades y zonas en las que las turbinas eólicas, ya sea de eje horizontal o vertical, no son las opciones más eficientes por la velocidad del viento, el entorno, las afectaciones al medio ambiente, entre otros factores, concluimos que se debe enfocar el diseño y optimización del Aeroflexor, Piezo-Leaf y Giro-Wind en mejorar su eficiencia a bajas velocidades, en el rango de tres a seis [m/s] de forma que realmente sean útiles en las zonas en las que otros sistemas de transducción de energía eólica no son muy adecuados. Aunque se puede considerar que la zona más eficiente de estos dispositivos es precisamente para esas velocidades de viento, la conclusión a la que llegamos es que se deben mejorar los diseños de manera que se extraiga un mayor porcentaje de energía a las corrientes de aire incidentes. De esta forma el funcionamiento de estos dispositivos debe tender a la zona más eficiente según el

teorema de Betz, es decir, se debe buscar que en la zona posterior a dichos dispositivos, el aire haya perdido  $2/3$  partes de su energía cinética inicial.

## 6.2. Recomendaciones y mejoras a futuro

Para trabajos posteriores se debería de diseñar una etapa experimental en la que se pudieran controlar y medir de mejor manera los parámetros de funcionamiento más importantes, al menos en lo que respecta a presiones y velocidades de viento, frecuencias de funcionamiento e incluso, si es posible medir la deformación del piezoeléctrico con galgas extensiométricas para el Giro-Wind y el Piezo-Leaf, de forma que se pueda modelar teóricamente su funcionamiento. De esta manera se podrá realmente comprobar si las consideraciones hechas en este trabajo fueron adecuadas o si se pasó por alto o se consideró de diferente forma algún factor. Esto permitirá que se pueda conocer de mejor manera la relación existente entre los voltajes generados por los dispositivos y su eficiencia mecánica, pues la relación encontrada en este trabajo no arroja información tan concluyente como se pretendía.

Para ello se recomienda emplear un arreglo de tubos de Pitot que estén fijos en la base del túnel de viento y que no se muevan o descentren fácilmente, de manera que queden alineados en todo momento con los dispositivos a prueba y de esta forma se pueda realmente conocer la variación en la energía cinética del viento una vez que haya pasado dicha corriente a través de la zona de operación de los dispositivos. La obtención de un rango de valores de velocidad posterior a los dispositivos podría permitir conocer la estela de aire que se forma en la parte posterior de los mismos, y entonces diseñarlos de forma que sea aprovechable dicha estela o al menos no afecte considerablemente a los dispositivos encontrados después de los primeros.

Se deberá de enfocar el diseño, etapa de pruebas y optimización de los dispositivos a velocidades más bajas, recomendándose restringir el rango de tres a seis [m/s] de manera que el funcionamiento más eficiente se presente para dichas velocidades. Esto tomando como consideración que en una gran cantidad de zonas urbanas a no muy elevadas alturas, es decir, en los tejados de casas o edificios pequeños, estos dispositivos no tendrán velocidades de viento muy altas y se deberá de enfocar su diseño y funcionamiento a este tipo de condiciones, más comunes que las de los rascacielos o edificios muy altos.

En el caso del Piezo-Leaf se podría explorar la posibilidad de incluir más “hojas” en el brazo de palanca de manera que pudiera tener un mejor comportamiento para corrientes de aire incidiendo en múltiples direcciones.

Otra recomendación interesante para los dispositivos cuyo principio de funcionamiento se basa en el uso de piezoeléctricos, sería conseguir una mayor variedad de dichos materiales, tanto en tamaños como en naturaleza de los mismos, los más fáciles de conseguir son el PVDF (Polifluoruro de Vinilideno) y las diferentes variantes de PZT (Plomo-Zirconato-Titanato), por lo que una comparación variando los materiales piezoeléctricos podría arrojar información interesante sobre el rango de funcionamiento, las frecuencias, deformaciones, diferencias de potencial y corrientes eléctricas generadas. De esta manera

se podrían diseñar dispositivos que respondieran a necesidades de funcionamiento mucho más específicas.

En lo referente al Aeroflexor la mayor mejora que identificamos consistiría en emplear el movimiento giratorio para la transducción de la energía cinética del viento en energía mecánica, o incluso a través de algún dispositivo piezoeléctrico o un generador, también se podría obtener energía eléctrica aprovechable. En caso de no cambiar el principio de funcionamiento y la zona de transducción de la energía, se propone aplicar los principios de inventiva de TRIZ. (Ver Apéndice B).

Finalmente y puesto que los dispositivos presentados a lo largo de este trabajo probablemente se encontrarán trabajando en arreglos con más de un dispositivo, es decir funcionando colectivamente, se propone que las pruebas de eficiencia colectiva se lleven a cabo como se intentó realizar con el Aeroflexor, con más de un dispositivo útil. El problema de no haber realizado esto para las pruebas del Giro-Wind y el Piezo-Leaf es que no se pudo conocer el funcionamiento de dos dispositivos trabajando juntos, de forma que uno de los dispositivos se sabe que a partir de cierta distancia comienza a tener un comportamiento semejante al que presenta cuando está solo. Pero puesto que el otro dispositivo utilizado en estas pruebas no estaba acoplado a un piezoeléctrico, no se conoce realmente la distancia mínima para la cual dos o más dispositivos funcionan adecuadamente. Lo que se podría solucionar fácilmente consiguiendo un piezoeléctrico extra que pudiera ser acoplado a otro dispositivo y entonces se midiera el funcionamiento de ambos durante la prueba de eficiencia colectiva. Si se pudiera hacer una prueba con una mayor cantidad de dispositivos, no solamente dos, los resultados serían mucho más interesantes y confiables a la hora de intentar conocer el funcionamiento colectivo de los arreglos estudiados.



## 7. VII – LISTA DE REFERENCIAS

### 7.1. Bibliográficas

- [1] F. P. Beer, et al., “Mecánica Vectorial para Ingenieros Estática”, Novena Edición, México: Ed. Mc. Graw Hill, 2010.
- [2] R. E. D. Bishop, D. C. Johnson, “The Mechanics of Vibration”, Primera edición revisada, Cambridge, Reino Unido: Ed. Cambridge University Press, 2011.
- [3] S. Deniz, TH. Staubli, “Oscillating Rectangular and Octagonal Profiles: Interaction of Leading- and Trailing-Edge Vortex Formation”, *Journal of Fluids and Structures*, 11, 6 - 31. 1996.
- [4] N. E. duToit et al, “Design considerations for MEMS-scale piezoelectric mechanical vibration energy harvesters”, *Journal of Integrated Ferroelectrics*, 71, 121 – 160. 2005.
- [5] A. Erturk, D. J. Inman, “Piezoelectric Energy Harvesting”, Primera Edición, Chichester, West Sussex, Inglaterra: Ed. Wiley, 2011.
- [6] European Wind Energy Association, Technology, “Wind Energy-The Facts: a guide to technology, economics and future of wind power”, Primera Edición, Londres, Inglaterra: Ed. Earthscan, 2009.
- [7] M. O. L. Hansen, “Aerodynamics of Wind Turbines”, Segunda Edición, Reino Unido: Ed. TJ International, 2008.
- [8] E. Hau, “Basic Concepts of Wind Energy Converters, in Wind Turbines Fundamentals, Technologies, Application, Economics”, Segunda Edición, Berlin, Alemania: Ed. Springer, 2006.
- [9] G. Jaramillo, A. Alvarado, “Electricidad y Magnetismo”, Primera Reimpresión, México D.F., México: Ed. Trillas, 2008.
- [10] D. M. Parks, “Euler-Bernoulli Beams: Bending, Buckling and Vibration”, Department of Mechanical Engineering, Mechanics and Materials II, MIT. 2004.
- [11] S. Roundy, P. K. Wright, “A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics”, *Smart Materials and Structures*, 13, 1131 – 1144. 2004.
- [12] A. C. Ugural, “Mechanics of Materials”, Primera Edición, USA: Ed. John Wiley & Sons, Inc. , 2008.
- [13] F. M. White, “Mecánica de Fluidos”, Primera Edición en español, México D.F., México: Ed. Mc. Graw Hill, 1988.

[14] J. Yang, "An Introduction to the Theory of Piezoelectricity", Primera Edición, New York, USA: Ed. Springer, 2005.

## 7.2. En línea

[15] J. Cace et al. (2007). Urban Wind Turbines. Guidelines for Small Wind Turbines in the Build Environment. [En línea]. Disponible: [http://www.urban-wind.org/pdf/SMALL\\_WIND\\_TURBINES\\_GUIDE\\_final.pdf](http://www.urban-wind.org/pdf/SMALL_WIND_TURBINES_GUIDE_final.pdf)

[16] City & Country of San Francisco Department of Public Works. (2013). San Francisco Public Utilities Commission (SFPUC) Headquarters at 525 Golden Gate. [En línea]. Disponible: <http://www.sfdpw.org/index.aspx?page=1145>

[17] DOE. (2013). Draft PPS 18: Renewable Energy Annex 1 Wind Energy: Spacing of Turbines. [En línea]. Disponible: [http://www.planningni.gov.uk/index/policy/policy\\_publications/planning\\_statements/pps18/pps18\\_annex1/pps18\\_annex1\\_wind/pps18\\_annex1\\_technology/pps18\\_annex1\\_spacing.htm](http://www.planningni.gov.uk/index/policy/policy_publications/planning_statements/pps18/pps18_annex1/pps18_annex1_wind/pps18_annex1_technology/pps18_annex1_spacing.htm)

[18] M. Hepperle. (2002). Basic Design of Flying Wing Models. [En línea]. Disponible: <http://www.mh-aerotools.de/airfoils/flywing1.htm>

[19] A. Ju. (2010, Mayo 25). Students harness vibrations from wind for electricity. [Electrónico]. Disponible: <http://www.news.cornell.edu/stories/may10/vibrowind.html>

[20] S. Li. (2009, Septiembre). Vertical-Stalk Flapping-Leaf Generator for Wind Energy Harvesting. [Electrónico]. Disponible: [http://creativemachines.cornell.edu/sites/default/files/SMASIS2009\\_LI.pdf](http://creativemachines.cornell.edu/sites/default/files/SMASIS2009_LI.pdf)

[21] A. Michler. (2011, Enero 20). Vibro-Wind Piezoelectric Pads Harness Wind Energy Without Turbines. [Electrónico]. Disponible: <http://inhabitat.com/vibro-wind-piezoelectric-pads-harness-wind-energy-without-turbines/>

[22] D. Quick. (2010, Octubre 13). Windstalk concept is a wind farm without turbines. [Electrónico]. Disponible: <http://www.treehugger.com/wind-technology/windstalk-concept-removes-blades-wind-power.html>

[23] M. Ragheb and A. M. Ragheb (2011). Wind Turbines Theory - The Betz Equation and Optimal Rotor Tip Speed Ratio, Fundamental and Advanced Topics in Wind Power [En Línea], disponible en: <http://www.intechopen.com/books/fundamental-and-advanced-topicsin-wind-power/wind-turbines-theory-the-betz-equation-and-optimal-rotor-tip-speed-ratio>

[24] K. N. Shelke and M.D. Duraphe. (2012, Diciembre). Magenn Air Rotor System (Mars). [Electrónico]. Disponible:

[http://www.ijera.com/papers/Vol2\\_issue6/HZ2615661568.pdf](http://www.ijera.com/papers/Vol2_issue6/HZ2615661568.pdf)

[25] S. Volynets. (2008). Helical Towers Could Bring Wind Turbines to Cities. [En línea]. Disponible: <http://goodcleantech.pcmag.com/science/280079-helical-towers-could-bring-wind-turbines-to-cities>

[26] L. Ward. (2007, Octubre 1). Windbelt, Cheap Generator Alternative, Set to Power Third World. [Electrónico]. Disponible: <http://www.popularmechanics.com/science/energy/solar-wind/4224763>

### **7.3. Patentes**

[27] D. B. Chang, "Wind Power Generator and Velocimeter," U.S. patent 5223763. Junio, 29, 1993.

[28] D. Labrecque, "Rotating Flexible Wing Power System", U.S. Patent 2009/0285668 A1, Nov 7, 2008.

[29] Y. Ting, "Wind Energy Generator Using Piezoelectric Material and Auxiliary Mechanisms Thereof," U.S. patent 0038250 A1. Febrero, 16, 2012.

[30] L. Weixing, "Bladeless Wind Power Generator", U.S. patent 8067878B1. Noviembre, 29, 2011.

### **7.4. Catálogos comerciales**

[31] *Piezoelectric Ceramics. Electro Ceramic Solutions*. Primera Edición. Morgan Technical Ceramics Inc., Bedford, OH, USA. 2007.

## 8. APÉNDICE A – Resolución del problema del Aeroflexor analizando directamente los 40 principios de inventiva.

*Presentación de las posibles soluciones para el mejoramiento del Aeroflexor a través de la aplicación del método TRIZ.*

A continuación se muestran las soluciones a los problemas presentados por el Aeroflexor inspiradas por los principios de inventiva.

### Segmentación

Dividir la palanca como un mecanismo que transforme el movimiento de oscilante a giratorio.

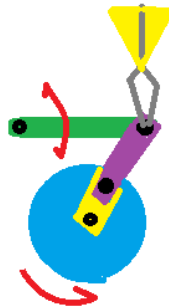


Fig. A.1. Modificación propuesta al mecanismo del Aeroflexor.

### Extracción

Sustituir la palanca con otro transductor como podría ser una bomba de agua y evitar la necesidad de transducir previamente la energía eólica en energía eléctrica.

### Contrapeso

Analizar si el resorte puede sustituirse por la masa de un volante de inercia que se acople al motor.

### Incremento dinámico o movilidad-acción periódica

Colocar un embrague o un piñón libre acoplado a un volante de inercia que ocasione que el dispositivo sólo gire en un sentido y se aproveche de esta manera la inercia.

### Acción excesiva o parcial

Almacenar la energía generada para dosificarla de una manera más adecuada al motor de CD.

### Vibración mecánica

Modificar el resorte o las dimensiones del ala para generar una mayor velocidad de oscilación.

Conducir una acción positiva continuamente

Con un arreglo de dos piñones libres unidos a un engrane que esté acoplado en uno de sus extremos al ala, se podrá aprovechar los dos sentidos posibles de la oscilación.

Retroalimentación

Instalar un sistema de control que utilice embragues para hacer más eficiente la transferencia de energía.

Mediador

Utilizar los embragues mencionados anteriormente.

Emplear un sistema hidráulico o neumático

Emplear una bomba u otro tipo de dispositivo hidráulico o mecánico que permita controlar el flujo de energía proveniente del Aeroflexor y hacia el motor de corriente directa empleado como generador.