



Universidad de Cuenca

Facultad de Ingeniería

Escuela de Electrónica y Telecomunicaciones

Sistema de instrumentación para la medición de esfuerzos sobre el aspa de un aerogenerador

*Trabajo de titulación previo a la
obtención del título de Ingeniero en
Electrónica y Telecomunicaciones*

Autores :

Christian Mauricio Llivisaca Puma C.I. 0104643168

Carlos Eduardo Mejía Mayancela C.I. 0105686034

Director :

Ing. Luis Ismael Minchala Avila, PhD C.I. 0301453486

Cuenca - Ecuador

2018



Resumen

En la actualidad el uso de la energía eólica como una fuente de energía libre de contaminación es una alternativa atractiva. Para que un parque eólico pueda operar de manera correcta es necesario tomar diferentes mediciones (velocidad del viento, dirección, etc.) con la intención de optimizar el proceso de generación de energía. Además, se busca proteger la estructura del aerogenerador ante condiciones ambientales adversas, tales como ráfagas de viento continuas o con variación donde la estructura pueda alcanzar un régimen resonante. Uno de los enfoques para reducir el costo del mantenimiento correctivo es la monitorización del estado del aspa para la detección temprana de fallas.

El propósito de este proyecto es el diseño e implementación de un sistema de instrumentación para la medición de esfuerzos sobre el aspa de un aerogenerador mediante galgas extensiométricas. Esto con la finalidad de monitorizar la salud estructural (evitar fracturas o rupturas), buscando aumentar la vida útil del aspa en un aerogenerador.

Para lo cual, se implementó un aerogenerador a manera de prototipo. En esta estructura se encuentran los módulos principales de comunicación tanto cableada como inalámbrica y el sistema de instrumentación. Este último procesa las mediciones que reflejan las galgas extensiométricas colocadas en el aspa en cuestión. Además, de dos módulos secundarios, el primero procesa el voltaje obtenido por un generador, debido al movimiento de las aspas. El segundo módulo es un control de ángulo de disparo, este tiene la finalidad de modificar la velocidad de viento de un ventilador. El cual será empleado como perturbación sobre las aspas.

Palabras clave : aspa, aerogenerador, galga extensiométrica, salud estructural, energía eólica.



Abstract

Currently, the use of wind energy as a source of pollution-free energy is an attractive alternative. For a wind farm to work properly, it is necessary to take different measures (wind speed, direction, etc.) with the intention of optimizing the energy generation process. In addition, it seeks to protect the structure of the wind turbine before adverse environmental conditions, such as continuous gusts of wind or with variations where the structure can reach a resonance regime. One of the approaches to reduce the cost of corrective maintenance is the supervision of the state of the blade for the early detection of faults.

The purpose of this project is the design and implementation of an instrumentation system to measure the effort in the blade of a wind turbine using voltage meters. This in order to monitor the structural health (avoid fractures or ruptures), looking to increase the life of the blade in a wind turbine.

For which, a wind turbine was implemented as a prototype. In this structure are the main cable and wireless communication modules and the instrumentation system. The latter processes the measurements that reflect the strain gauges placed on the blade in question. In addition, of two secondary modules, the first one processes the voltage obtained by a generator, due to the movement of the blades. The second module is a tripping angle control, this has the purpose of modifying the wind speed of a fan. That will be used as a disturbance in the blades.

Keywords : blade, wind turbine, strain gage, structural health, wind energy.



Índice general

Resumen	III
Abstract	IV
Índice general	V
Índice de figuras	IX
Índice de tablas	XII
Dedicatoria	XVIII
Agradecimientos	XIX
1. Introducción	2
1.1. Introducción	3
1.2. El problema de la investigación	4
1.3. Objetivos	6
1.3.1. Objetivo general	6
1.3.2. Objetivos específicos	6



1.4. Revisión literaria	6
1.5. Contribuciones de la tesis	8
2. Marco Teórico	9
2.1. Introducción	10
2.2. Viento	10
2.3. Potencial eólico	12
2.4. Impacto de la altura de la torre	14
2.5. Límite de Betz	16
2.6. Tipos de aerogeneradores	20
2.6.1. Aerogeneradores de eje horizontal	22
2.6.2. Componentes de un aerogenerador	23
2.7. Sistemas de medición de esfuerzos	28
2.7.1. Medidores de deformación convencionales	29
2.7.2. Sensores de fibra óptica	30
2.7.3. Acelerómetros	31
2.7.4. Sensores emisión acústica (AE)	31
2.7.5. Sensores piezoeléctrico (PZT)	32
2.7.6. Sensores de vibrómetro doppler láser (SLDV)	32
3. Diseño del circuito de medición	34
3.1. Descripción general	35
3.2. Descripción de circuitos y componentes	36
3.2.1. Puente de Wheatstone	36



3.2.2.	Balance del puente	37
3.2.3.	Amplificador de instrumentación AD8221	37
3.2.4.	Filtro paso bajo	39
3.2.5.	Procesamiento	41
3.3.	Esquema electrónico del circuito de medición	41
3.3.1.	Diseño PCB	42
3.4.	Estructura del aerogenerador	44
3.5.	Diseño del sistema de comunicación	46
3.5.1.	Sistema de comunicación mediante anillos deslizantes	46
3.5.2.	Sistema de comunicación inalámbrico	47
3.6.	Diseño de la interfaz gráfica	50
3.7.	Ubicación de las galgas extensiométricas	51
3.7.1.	Simulaciones	51
3.8.	Ventilador controlado	53
3.9.	Análisis de consumo energético	54
4.	Resultados de mediciones efectuadas sobre el aspa	55
4.1.	Experimentos estáticos	56
4.2.	Experimentos dinámicos	60
4.2.1.	Ensayo 1	61
4.2.2.	Ensayo 2	62
4.2.3.	Ensayo 3	63
4.2.4.	Ensayo 4	65



4.2.5. Ensayo 5	66
4.3. Análisis estadístico de los ensayos	67
4.4. Análisis de los ensayos en el dominio de la frecuencia	71
4.5. Evaluación del sistema inalámbrico	73
4.6. Sistema remoto - ThingSpeak	74
5. Conclusiones	75
5.1. Conclusiones	76
5.2. Recomendaciones	77
5.3. Trabajos futuros	77
A. Código fuente - Servidor ESP8266	80
B. Código fuente - Cliente ESP8266	83
C. Código fuente - Módulo serial	86
D. Algoritmo de inicio	88
E. Amplificador de instrumentación	90
Bibliografía	116



Índice de figuras

2.1. Patrones globales de viento [1]	11
2.2. Potencia del viento	13
2.3. Impacto de la altura de la torre	16
2.4. El viento que se aproxima se ralentiza y se expande a medida que una parte de su energía cinética es extraída por la turbina eólica, formando el tubo de corriente que se muestra.	17
2.5. Eficiencia máxima de la hélice	20
2.6. Tipos de turbinas de viento	21
2.7. Componentes de un aerogenerador	23
2.8. Porcentaje de inversión en un aerogenerador [24]	24
2.9. Perfil alar	28
2.10. El índice de refracción de las rejillas (n_g) es diferente del núcleo (n_c), y se separan periódicamente a la distancia λ . Las longitudes de onda en λb se reflejan.[2]	30
2.11. Esquemas de adquisición de datos usando el sistema LDV.[3]	33
3.1. Diagrama de Bloques del instrumento de medición	35
3.2. Puente completo Wheatstone	36
3.3. Circuito para eliminar el <i>offset</i>	37



3.4. Amplificador AD8221	38
3.5. Circuito para el uso de galgas extensiométricas. Anexo E	39
3.6. Configuración inicial del filtro	39
3.7. Respuesta en frecuencia del filtro	40
3.8. Circuito correspondiente al filtro paso bajo	41
3.9. Esquema electrónico	42
3.10. Esquema electrónico para el dispositivo de medición	43
3.11. Diseño final del PCB	43
3.12. Prototipo del aerogenerador	44
3.13. Disco de soporte de módulos	45
3.14. Ubicación del disco sobre el <i>hub</i> del aerogenerador	45
3.15. Sistema de comunicación mediante anillos deslizantes	46
3.16. Implementación del sistema de comunicación basado en anillos deslizantes	47
3.17. Circuito empleado para el multiplexor analógico	48
3.18. Sistema de comunicación inalámbrico	49
3.19. Interfaz gráfica	50
3.20. Modelo del Aspa 1	51
3.21. Análisis de esfuerzo en Aspa 1	52
3.22. Modelo del Aspa 2	52
3.23. Análisis de esfuerzo en Aspa 2	52
3.24. Región delimitada para la ubicación de galgas extensiométricas	53
3.25. Esquema del ventilador controlado	53



4.1. Experimento para determinar la fuerza sobre el aspa	56
4.2. Voltaje de salida vs masa	57
4.3. Experimento para determinar el desplazamiento de la punta del aspa	58
4.4. Voltaje de salida vs desplazamiento <i>tip</i>	59
4.5. Diagrama del experimento sobre el aerogenerador	60
4.6. Resultados ensayo 1	61
4.7. Resultados ensayo 2, anillos deslizantes e interfaz inalámbrica	62
4.8. Resultados ensayo 3, anillos deslazantes	63
4.9. Resultados ensayo 3, interfaz inalámbrica	64
4.10. Resultados ensayo 4, anillos deslizantes e interfaz inalámbrica	65
4.11. Resultados ensayo 5, anillos deslizantes e interfaz inalámbrica	66
4.12. Resumen de los ensayos a distintas velocidades de viento	67
4.13. Resumen de los ensayos 1 y 5 a una velocidad de 1.5m/s con diferente ángulo pitch	68
4.14. Dominio de la frecuencia	71
4.15. Análisis en frecuencia	72
4.16. Evaluación del sistema inalámbrico	73
4.17. Cargas sobre el aspa	74
4.18. Desplazamiento <i>tip</i>	74



Índice de tablas

2.1. Aspectos de la energía eólica	12
2.2. Coeficiente de fricción para varios terrenos de diferentes características	15
2.3. Clasificación de rugosidad	15
3.1. Descripción de pines amplificador AD8221.	38
3.2. Consumo del sistema de instrumentación	54
4.1. Análisis ensayo 1 (1.5m/s)	68
4.2. Análisis ensayo 2 (2.5m/s)	69
4.3. Análisis ensayo 3 (5m/s)	69
4.4. Análisis ensayo 4 (gradual)	70
4.5. Análisis ensayo 5 (pitch=10°)	70

Cláusula de Propiedad Intelectual

Yo, Christian Mauricio Llivisaca Puma, autor del trabajo de titulación "Sistema de instrumentación para la medición de esfuerzos sobre el aspa de un aerogenerador", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 23 de marzo de 2018



Christian Mauricio Llivisaca Puma

C.I: 010464316-8

Cláusula de Propiedad Intelectual

Yo, Carlos Eduardo Mejía Mayancela, autor del trabajo de titulación "Sistema de instrumentación para la medición de esfuerzos sobre el aspa de un aerogenerador", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 23 de marzo de 2018



Carlos Eduardo Mejía Mayancela

C.I: 010568603-4

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Yo, Christian Mauricio Llivisaca Puma, en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Sistema de instrumentación para la medición de esfuerzos sobre el aspa de un aerogenerador", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 23 de marzo de 2018



Christian Mauricio Llivisaca Puma

C.I: 010464316-8

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Yo, Carlos Eduardo Mejía Mayancela, en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Sistema de instrumentación para la medición de esfuerzos sobre el aspa de un aerogenerador", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 23 de marzo de 2018



Carlos Eduardo Mejía Mayancela

C.I: 010568603-4

Certifico

Que el presente de proyecto de tesis: "Sistema de instrumentación para la medición de esfuerzos sobre el aspa de un aerogenerador", fue dirigido y revisado por mi persona.

Cuenca, 23 de marzo de 2018



Ing. Luis Ismael Minchala Ávila, PhD

C.I: 030145348-6

Director



Dedicatoria

A mi madre María Eugenia.

Por el ejemplo de perseverancia y constancia que la caracterizan, por sus consejos, valores y la motivación que siempre me ha dado, lo que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor.

Christian Llivisaca

A mis padres Carlos y Noemí.

Quienes han sido una guía y pilares fundamentales en mi vida. A mi madre, que siempre estuvo ahí, para que nunca perdiera el rumbo. A mi padre, de quien aprendí lo necesario para culminar esta linda pero difícil carrera, gracias por ser un ejemplo.

Carlos Mejía Mayancela



Agradecimientos

A nuestros familiares

Que nos han brindado todo lo necesario para nuestro crecimiento personal. Son y han sido un verdadero apoyo diario en nuestra vida y a lo largo de nuestra carrera universitaria, y esperamos que lo sigan siendo ...

¡Gracias a ustedes!

A nuestros amigos

Quienes siempre nos apoyaron. Y a quienes participaron directa o indirectamente en la elaboración de este proyecto.

¡Gracias!

Al Club de Robótica de la Universidad de Cuenca.

Agradecemos al CRUC y a sus autoridades por la acogida en sus instalaciones y todos los buenos momentos compartidos.

A nuestros maestros.

Quienes nos guiaron en cada etapa de nuestra vida universitaria, pero especialmente al Ingeniero Ismael Minchala por su gran apoyo y motivación para la elaboración de esta tesis, y en nuestra carrera profesional, nuestros más sinceros agradecimientos.

Christian y Carlos



Capítulo 1

Introducción



En este capítulo, se presenta el problema a tratar, así como los objetivos general y específicos a cumplir durante este proyecto técnico. Además de una breve revisión literaria y la contribución del mismo.

UNIVERSIDAD DE CUENCA
desde 1867



1.1. Introducción

Uno de los problemas que en la actualidad tienen los gobiernos a nivel mundial son las emisiones contaminantes. Esto se considera un factor importante que repercute en el desarrollo y progreso de una sociedad. La generación de energía eléctrica en sus diferentes maneras de producción, también se encuentra ligado a la contaminación, puesto que se requieren grandes construcciones para poner en marcha los distintos proyectos de generación eléctrica. Pero en cualquier ámbito se considera un bien fundamental que ayuda al crecimiento de un país o región.

En [4] se menciona la necesidad de obtener energía de una manera limpia y segura, lo que ha facilitado la creciente demanda de las llamadas energías alternativas. Es importante también reducir costes en su producción. La finalidad es la de competir frente a fuentes convencionales de generación eléctrica como la energía nuclear y combustibles fósiles. La referencia [5] establece una solución para reducir la contaminación en la generación de electricidad, que comprende la utilización de turbinas de viento (energía eólica) y paneles fotovoltaicos (energía solar). Estas energías alternativas, en pequeña escala ofrecen la posibilidad de abastecer de electricidad a comunidades aisladas. Sin embargo, para interconectar estas tecnologías de generación a la red de distribución eléctrica de una región es necesaria una gran cantidad de turbinas y/o paneles fotovoltaicos. Además, para que dicha energía puede sumarse a la red de interconexión de un país se debe cumplir con los parámetros de calidad de energía eléctrica.

En general la energía eólica se define como la transformación de la energía cinética del viento en eléctrica mediante la implementación de aerogeneradores. Estos emplean hélices para transmitir el movimiento que produce el viento al rotor de un alternador. Como lo menciona [6] es necesario contar con los denominados parques eólicos con la finalidad de generar electricidad suficiente para verter en la red de distribución de una región. Los autores de [7] y [8] mencionan que la energía eólica es un método de generación eléctrica no contaminante que evita daños ambientales, comparado con otras formas de producción eléctrica (nuclear y fósiles).

En [9] se aborda la situación de la energía eléctrica en el Ecuador, aquí se establece que el sector energético es estratégico para el gobierno, y así lo demuestran los distintos programas y planes puestos en marcha. La energía eólica en los últimos años ha tenido un gran impulso en su desarrollo gracias a las Cumbres de Rio de Janeiro “Tierra, 1992”, de Kioto “Clima, 1997” y de París “COP21, 2015”, en el que se busca reducir las emisiones contaminantes buscando la estabilidad de la atmósfera global. Además, el de aumentar el porcentaje de participación de las energías renovables [6].

Se dice que el Ecuador, a pesar de ser un país productor de petróleo, es energéticamente dependiente. Aunque la situación actual de las diferentes hidroeléctricas ayuda a subsanar estas debilidades, se plantea otro punto de vista, el cual habla sobre la contaminación que generan



dichas construcciones. Como menciona [9], la energía eólica ha llegado a un punto en el que se puede asumir que es económicamente competitiva y con una tecnología de aprovechamiento madura. Además, se dice que un desarrollo energético que busca minimizar la contaminación favorece a la aceptación por parte de la sociedad. La aceptación social también genera una demanda para el desarrollo de los diferentes métodos de generación de energía eléctrica. En [7] se muestran resultados de encuestas en Dinamarca, Estados Unidos y Reino Unido, en donde la mayoría de la población ve de manera positiva la generación de energía mediante recursos renovables, como el viento. Sin embargo, en [6] establecen que aun la instalación de un parque eólico genera un impacto ambiental, por lo que se debe tener en consideración las condiciones del entorno tanto físico como del ámbito social.

El presente proyecto busca aumentar la vida útil de las hélices de las turbinas a través del monitoreo de variables de esfuerzo sobre las aspas de los aerogeneradores. Esto ayudaría a la rentabilidad de la energía eólica como medio de generación eléctrica. En [5] se menciona que gran cantidad de investigación que se realiza actualmente sobre la energía eólica se centra en la búsqueda de turbinas que requieran un mínimo de mantenimiento, tengan un bajo costo y una alta producción energética.

El propósito de este proyecto es medir el estrés sobre el aspa de un aerogenerador, dichas mediciones servirían como información útil, sobre el estado del aspa ante el impacto del viento.

1.2. El problema de la investigación

La tecnología ha permitido el desarrollo de máquinas eólicas de eje horizontal, tripalas, con alta calidad de suministro eléctrico, bajo mantenimiento y vida operativa que supera los veinte años. El diseño básico de los aerogeneradores que se fabrican en la actualidad admite modificaciones de altura de la torre y del diámetro de rotor, con el fin de optimizar el rendimiento energético de un emplazamiento con recursos eólicos determinados. Entre las mejoras para captar la energía del viento, en los últimos años se han introducido novedades como torres más altas, rotores más potentes, aspas más resistentes y de mayor envergadura, mejoras en la electrónica y mejor uso de los materiales compuestos. La mejora más impresionante ha sido el aumento en tamaño y rendimiento de los aerogeneradores. En el futuro se fabricarán turbinas incluso más grandes destinadas a parques eólicos marinos, que constituyen un mercado emergente de gran interés, debido a que además de causar un menor impacto paisajístico, ofrecen la ventaja de emplearse en lugares con vientos más fuertes que los presentes en tierra [5].

El mantenimiento de una turbina eólica es un desafío particular, porque las turbinas de viento a menudo se encuentran en regiones remotas (incluida la costa). El monitoreo de salud estructural



(SHM, por sus siglas en inglés) es un enfoque prometedor que puede permitir el mantenimiento preventivo, reducir el tiempo de inactividad y reducir significativamente los costos de reparación. Si bien la falla puede ocurrir en cualquier componente estructural, uno de los componentes más comunes y críticos para fallar son las aspas de la turbina eólica. Las aspas pueden afectar negativamente la operación, la seguridad y la generación de energía en caso de falla [10]. Es particularmente difícil monitorear continuamente la salud de la hélice: (1) las aspas son bastante largas y extensas, se requiere un conjunto de sensores; y (2) las aspas están girando, lo que plantea problemas para suministrar energía y recibir datos de los sensores.

El daño a la hélice a menudo comienza con una grieta en su raíz, que puede conducir a la separación y delaminación a medida que está experimenta una carga cíclica. Los autores de [11] consideran diversos enfoques de detección para el control de la salud estructural, en las hélices o palas de aerogeneradores, que incluyen: sensores acústicos, acelerómetros, extensímetros, transductores piezocerámicos y sensores de fibra óptica. Estos sensores están en la capacidad de proporcionar información de tensión, aceleración y datos de vibración/acústica en tiempo real. Los datos del sensor se procesan utilizando algoritmos diseñados para predecir la ubicación y la extensión del daño en función de los datos del sensor. Los autores identificaron “puntos calientes” en el aspa, donde es probable que ocurra una falla. Estos puntos clave incluyen la raíz de la hoja, un 30 % de extensión desde la raíz y un 70 % de extensión desde la raíz.

Para el presente proyecto, y como se mostrará más adelante, los puntos críticos serán identificados mediante la simulación de la hélice frente a una fuerza. Este generará estrés sobre la misma, analizando así el punto de máxima tensión.

En el contexto anterior y como parte de las diferentes investigaciones que se realizan sobre la energía eólica. Este proyecto busca el monitoreo de la salud estructural de las hélices de una turbina eólica. Esto ayudará a la toma de decisiones sobre el mantenimiento de las mismas, reducir el tiempo de inactividad y mejorar la confiabilidad de las turbinas eólicas. Se busca alargar la vida operativa de una de las partes más importantes de la turbina eólica, además de una operación segura.

Se ha propuesto el uso de galgas extensométricas para estimar la fatiga que sufren las hélices con el fin de transmitir datos a un sistema de monitoreo y junto con estos, dar la posibilidad de tomar acciones de control que permitan evitar daños estructurales que se traduzcan en pérdidas económicas. Los autores de [8] mencionan que existen algunos errores en la medición del estrés en las hélices de la turbina eólica, como el compuesto del material, pero especialmente la temperatura que es una de las fuentes de error constante para la medición. El análisis realizado indica que las fuerzas axiales y de corte pueden desprejarse como fuentes de interferencia al medir los momentos de flexión de la raíz del aspa. Un método que soluciona el problema de la temperatura es la utilización del puente de Wheatstone.



1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Diseñar e implementar un sistema de instrumentación prototipo para la medición de esfuerzos sobre el aspa de un aerogenerador, mediante galgas extensiométricas.

1.3.2. Objetivos específicos

- Diseñar un sistema de acondicionamiento que procese la medición obtenida por las galgas extensiométricas.
- Diseñar un sistema de comunicación que transmita la información desde el punto de medición a la cabina de control.
- Implementar un interfaz para la visualización local y remota de la información extraída por las galgas extensiométricas.

1.4. Revisión literaria

Las mediciones de deformación en una turbina eólica normalmente se centran en las aspas y en la base de la torre con el fin de determinar los momentos de flexión en esos lugares. Se pueden obtener más detalles de la carga tomando medidas en varios puntos a lo largo de la torre o de las aspas, lo que normalmente se hace durante las pruebas estructurales de los componentes o las pruebas de campo de las turbinas prototipo [12].

Para muchas aplicaciones, las galgas extensiométricas son la herramienta más común para la medición de deformaciones. Debido a su bajo costo, amplia disponibilidad y propiedades bien entendidas, pero tienen varias desventajas para el control de carga en turbinas eólicas. El problema más importante es la dificultad de obtener mediciones precisas a largo plazo. La delgada lámina o alambre utilizado en las galgas metálicas envejece rápidamente, lo que provoca que las lecturas se desvíen y eventualmente requieran reemplazo debido a la fatiga [12]. Los resultados de una prueba de campo utilizando galgas metálicas en una turbina eólica informaron que la descompensación de voltaje en el sistema de medición tenía que restablecerse después de seis semanas de prueba. La medición era lo suficientemente grande como para provocar la saturación de la señal [13]. Otro estudio estima la vida útil típica de los galgas extensiométricas instaladas en el rotor de turbina eólica entre 1 y 3 años [14]. La compensación de temperatura puede ser otra fuente importante de error en las mediciones de galgas extensiométricas [8]. A pesar de las desventajas de los medidores de tensión metálicos para el monitoreo de la carga



a largo plazo, se han aplicado durante períodos más cortos para comprobar estrategias de control activo [15]. En un trabajo experimental se utilizan seis galgas extensiométricas en un aerogenerador de 80 metros de altura. Se instalan dos galgas en cada aspa. Las galgas se ubican en una región cercana a la raíz del aspa. El sistema de medición proporcionaba información sobre la deformación de cada aspa y provee la información a una tasa de 32 Hz [16].

En [16] además de emplear galgas extensiométricas, aplican una técnica conocida como fotogrametría. Esta técnica permite determinar propiedades geométricas de objetos y situaciones espaciales a partir de imágenes fotográficas. La fotogrametría generalmente requiere que se coloquen algunos marcadores en el objeto a ser rastreado. Los sistemas de cámara simplemente siguen el movimiento de estos marcadores desde diferentes orientaciones y construyen los vectores de deformación tridimensional. Los marcadores generalmente están compuestos por materiales retroreflectantes. En el aerogenerador, se colocaron en total 50 marcadores (10 marcadores en cada aspa y 20 marcadores en la torre). Los marcadores se tratan de pegatinas muy delgadas (forma redonda, 400 mm de diámetro), por lo cual se consideró que no afectarían las propiedades estructurales o aerodinámicas del aspa. La cámara encargada de recolectar las imágenes estaba situada a 220 metros de la turbina eólica.

Otro trabajo experimental, emplea cuatro galgas sobre un aspa. Dos galgas situadas en el perfil superior aerodinámico y otras dos galgas situadas en el perfil inferior aerodinámico. Cada par de galgas de igual manera que en el anterior trabajo experimental se sitúan cerca de la raíz del aspa en dirección axial. La configuración de las galgas es de medio puente [17]. Con esto el autor busca mejorar las mediciones de esfuerzo, mediante la disminución del error, agregando una medida de torsión.

Los sistemas de sensores instalados en aerogeneradores necesitan una fuente de energía y un medio para comunicar su salida. Si los sensores están ubicados en la parte giratoria de la turbina, las conexiones cableadas deben viajar a través de anillos deslizantes. El número de canales de anillo deslizante es generalmente bajo. Lo que ha despertado el interés en el uso de la comunicación inalámbrica. Los sistemas inalámbricos pueden consolidar la salida de varios sensores y transmitir datos utilizando un módem inalámbrico, eliminando la necesidad de líneas de comunicación individuales entre cada sensor y un procesador central de datos. La transmisión puede interrumpirse si la calidad de la señal es baja, por lo que un sistema de sensor inalámbrico debe identificar los paquetes descartados para su retransmisión [12]. En una prueba realizada en el año 2014, de un sistema de sensor inalámbrico en una turbina eólica de 2 MW. Aproximadamente el 5-6% de los paquetes de datos de los sensores inalámbricos en la parte superior de la torre requirieron múltiples intentos de transmisión a la base de la torre [18].



1.5. Contribuciones de la tesis

El viento que impacta sobre las aspas de un aerogenerador no solo contribuye a la generación de energía eléctrica, sino que también produce que las aspas sufran una deformación en dirección axial. Con la implementación de galgas extensiométricas sobre el aspa del aerogenerador es posible adquirir información importante del estado del aspa (deformación, esfuerzo, etc.).

La finalidad del sistema propuesto reside monitorear el estado del aspa, con el fin de evitar fracturas o rupturas sobre la estructura del aspa. El sistema de instrumentación basado en galgas extensiométricas cumple con dos funciones:

- Medición de la deformación presente en el aspa
- Visualización local y remota de la información capturada

Para llevar a cabo las mediciones por parte del sistema de instrumentación se diseñó y construyó un prototipo de un aerogenerador de eje horizontal. El sistema de medición está ubicado sobre un punto específico del aspa del prototipo. Dicho sistema permite extraer información referente a la deformación, carga y desplazamiento del aspa debido al impacto del viento.



Capítulo 2

Marco Teórico



En el presente capítulo, se abordan algunos fundamentos teóricos relacionados con la energía eólica, la potencia que se obtiene del viento y una breve introducción a los aerogeneradores.

UNIVERSIDAD DE CUENCA
desde 1867



2.1. Introducción

La fuerza que genera el aire (viento) ha sido empleada desde hace siglos en distintos ámbitos, que van desde el transporte marítimo y aplicaciones agrícolas (molinos y bombas de agua), hasta la generación de energía eléctrica a gran escala.

La energía eólica es una fuente de energía renovable. Tiene su origen en el movimiento de las masas de aire, es decir, el viento. Dispone de una tecnología madura, por lo que su explotación es técnica y económicamente viable, lo que le convierte en una alternativa de generación eléctrica rentable frente a las tradicionales (nuclear, carbón, petróleo y gas).

El fenómeno del viento está presente alrededor del mundo, pero la cantidad de potencialidad disponible en cada sitio es lo que hace interesante a ciertos lugares para su explotación. En general, las zonas costeras, las llanuras interiores abiertas, los valles transversales y las zonas montañosas son donde existe mayor potencial [19]. En [20] se mencionan razones por las que se presta una especial atención a las energías renovables, como es: la búsqueda de fuentes de energía que satisfaga la gran demanda de electricidad especialmente en las zonas más pobladas; la necesidad de potenciar fuentes de energía que ahorren combustibles fósiles, ahorrando recursos agotables; y la disminución de la emisión de gases contaminantes y los diferentes residuos contaminantes que se generan de los métodos tradicionales de obtención de energía eléctrica.

Las referencias [1] y [20] presentan las principales ventajas de la energía eólica, pero también mencionan algunos de los problemas que tiene asociado este tipo de tecnología. Finalmente se mencionan algunos aspectos relacionados con el impacto medioambiental ligado a la instalación de las turbinas eólicas. Lo antes mencionado se encuentra resumido en la (Tabla 2.1).

desde 1867

2.2. Viento

Los vientos son movimiento de masas de aire en la atmosfera a gran escala. Estos movimientos de aire se crean a escala global, principalmente, debido al distinto calentamiento de la atmósfera terrestre por el sol. Por tanto, la energía eólica puede considerarse como una forma indirecta de energía solar. El aire en las regiones ecuatoriales se calienta más fuertemente que en otras latitudes, por lo que se vuelve más ligero y menos denso. El aire caliente asciende y fluye hacia los polos donde el aire cerca de la superficie es más frío. Este movimiento cesa a unos 30°N y 30°S, donde el aire empieza a enfriarse y concentrarse, y en las capas más bajas de la atmosfera tiene lugar un flujo de retorno de este aire más fresco. En la Figura 2.1 se puede observar este esquema de comportamiento.

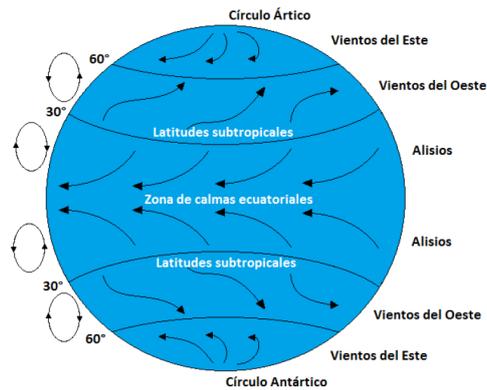


Figura 2.1: Patrones globales de viento [1]

Cuanto más grande es el gradiente de presión, mayor es la fuerza sobre el aire y más elevada es la velocidad del viento. Como la dirección de la fuerza va desde la más alta hacia la más baja presión, y perpendicular a las isobaras (líneas de igual presión), la tendencia inicial del aire es soplar paralelo al gradiente horizontal de la presión y perpendicular a las isobaras. Sin embargo, tan pronto como se establece movimiento de viento, se produce una fuerza deflectiva debido a la rotación de la Tierra, que altera la dirección del movimiento [20].

El gradiente horizontal de presiones viene representado en los mapas meteorológicos mediante las isobaras, que son líneas que unen los puntos de igual presión. Otra forma usual de representar las presiones son los mapas de isohipsas. En ellos se representa la altura a la cual se tiene una determinada presión. Los movimientos de masas de aire tienden a compensar las diferencias de presión, de modo que, a mayor gradiente de presión, mayor velocidad de viento [21].

Además de la circulación global del viento, hay una gran cantidad de efectos locales. La diferencia de temperatura entre la tierra y el mar también produce cambios en el flujo general. La naturaleza del terreno (montañas, valles), obstáculos, edificios, árboles, etc., tienen un importante efecto sobre el viento. Las características locales de cada zona determinan también una forma muy importante de viento.



Tabla 2.1: Aspectos de la energía eólica

Ventajas	No hay emisiones contaminantes, ni afluentes líquidos y gaseosos ni residuos sólidos.
	Fuente energía renovable, sin requerir procesos de extracción subterránea o minería.
	Ahorra combustibles fósiles y diversifica el suministro energético.
Problemas	El viento es disperso y de gran variabilidad y fluctuación, tanto en velocidad como en dirección, por lo que no todos los lugares son adecuados para una explotación de técnica y económicamente viable.
Impacto medioambiental	Un aerogenerador puede producir ruido que puede ser molesto si se está situado en un lugar cercano a éste. Este ruido no supera los 50-60 dB a una distancia de 200 metros del aerogenerador.
	Impacto sobre la fauna. En especial durante la fase de instalación, debido a que genera desplazamientos temporales.
	Los parques eólicos requieren de un área de terreno extensa, dada la distancia que deben estar separados los aerogeneradores. Se busca evitar la sombra eólica o perturbación entre máquinas.
	Generan interferencia con transmisiones electromagnéticas.

2.3. Potencial eólico

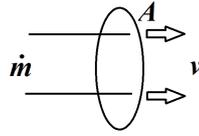
El viento considerado como recurso energético y desde el punto de vista de su disponibilidad como suministro, tiene características específicas: es una fuente con sustanciales variaciones temporales, a pequeña y gran escala de tiempo, y espaciales, tanto en superficie como en altura, contando además con una componente aleatoria que afecta en gran parte a su variación total. Asimismo, se debe considerar que la energía eólica disponible por unidad de área expuesta al viento es proporcional al cubo de la velocidad, por lo que pequeñas variaciones en la velocidad de viento conllevan sensibles variaciones en la energía suministrada [20].

Si consideramos una masa de aire m que se mueve a una velocidad v , la energía cinética KE de esta masa, se define por la siguiente relación:

$$KE = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.1)$$

Como la potencia es energía por unidad de tiempo, la potencia representada por esta masa de aire que se mueve a cierta velocidad v a través de un área A será:

$$\text{Potencia a través del área } A = \frac{\text{Energía}}{\text{Tiempo}} = \frac{1}{2} \left(\frac{\text{Masa}}{\text{Tiempo}} \right) v^2 \quad (2.2)$$



La tasa de flujo de masa \dot{m} a través del área A , es el producto de la densidad de aire ρ , velocidad v y el área de sección transversal A :

$$\left(\frac{\text{Masa que atraviesa } A}{\text{Tiempo}} \right) = \dot{m} = \rho Av \quad (2.3)$$

Combinando 2.3 con 2.2 se obtiene la siguiente relación:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2.4)$$

donde P_w es la potencia del viento (vatios); ρ es la densidad del aire (kg/m^3) (a $15^\circ C$ y $1 atm$, $\rho = 1,225 kg/m^3$); A es la sección transversal a través la cual el viento pasa (m^2); y $v =$ velocidad perpendicular del viento en dirección a las sección transversal A ($1 m/s = 2,237 mph$). Esto en las unidades del sistema internacional.

Se muestra de manera gráfica la ecuación 2.4 en la Figura 2.2, considerando que la potencia que se indica es por unidad de área, más conocida como potencia específica o densidad de potencia. Analizando la ecuación y la gráfica se puede observar que la potencia aumenta al cubo de la velocidad del viento.

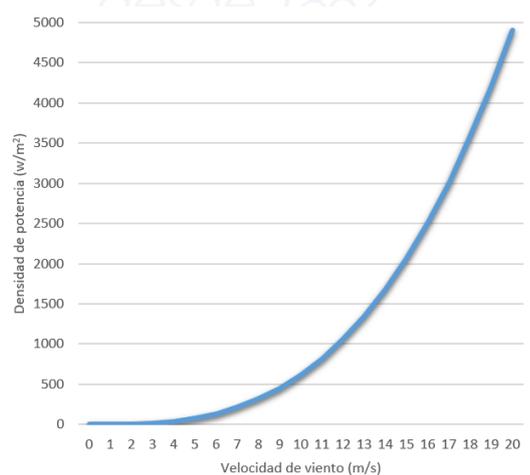


Figura 2.2: Potencia del viento



La ecuación 2.4 también indica que la potencia eólica es proporcional al área barrida por el rotor de la turbina. Para una turbina de eje horizontal convencional, el área A es simplemente $A = (\pi R^2)$, por lo que la potencia eólica es proporcional al cuadrado del diámetro de la hélice. Duplicar el diámetro aumenta la potencia disponible por un factor de cuatro. Esa simple observación ayuda a explicar las economías de escala que acompañan a las turbinas eólicas más grandes. El costo de una turbina aumenta aproximadamente en proporción al diámetro de la hélice, pero la potencia es proporcional al diámetro al cuadrado, por lo que máquinas más grandes han demostrado ser más rentables.

Debido a que debe cumplirse la ecuación de la conservación de la masa en el flujo de aire (condición de continuidad), no se puede extraer toda la potencia eólica disponible del viento. La cantidad de potencia eólica aprovechable depende, además de la potencia eólica disponible (velocidad de viento), de las características de funcionamiento de la máquina. Esta potencia aprovechable solo hace referencia a la potencia mecánica en el eje del rotor y no a la eléctrica generada tras pasar la potencia por el multiplicador y generador [20].

C_p es denominado coeficiente de potencia, y expresa la relación entre la potencia extraída en el rotor P_b y la potencia disponible P_w . La relación entre ambas potencias es:

$$P_b = C_p \cdot P_w \quad (2.5)$$

El máximo valor teórico de C_p establecido a partir de la teoría del rotor es del 59%. Este valor es conocido como el Límite de Betz, que se abordará más adelante.

2.4. Impacto de la altura de la torre

Una forma de llevar la turbina a vientos más fuertes es montarla en una torre más alta. En los primeros cientos de metros sobre el suelo, la velocidad del viento se ve muy afectada por la fricción que experimenta el aire a medida que se mueve a través de la superficie de la tierra. Las superficies lisas, como un mar en calma, ofrecen muy poca resistencia, y la variación de velocidad con la elevación es modesta. En el otro extremo, los vientos de superficie se ralentizan considerablemente debido a las altas irregularidades, como bosques y edificios. Una expresión que se usa a menudo para caracterizar el impacto de la rugosidad de la superficie de la tierra sobre la velocidad del viento es la siguiente:

$$\left(\frac{v}{v_0}\right) = \left(\frac{H}{H_0}\right)^\alpha \quad (2.6)$$

donde v es la velocidad del viento a una altura H , v_0 es la velocidad del viento a una altura H_0 (a menudo una altura de referencia de 10 m), y α es el coeficiente de fricción. El coeficiente de fricción α representa el rozamiento entre el viento y el terreno por el cual fluye. La Tabla 2.2 proporciona algunos valores representativos para tipos de terreno [22].

Tabla 2.2: Coeficiente de fricción para varios terrenos de diferentes características

Características del terreno	Coeficiente de fricción
Terreno liso y duro, aguas tranquilas	0.1
Hierba alta en terreno llano	0.15
Cultivos altos y arbustos	0.20
Campo arbolado (muchos árboles)	0.25
Pequeño pueblo con árboles y arbustos	0.3
Gran ciudad con edificios altos	0.4

A menudo, para aproximaciones en terreno algo abierto, se usa un valor de $1/7$ (la regla empírica de "un séptimo") para α . Si bien la ecuación 2.6 se usa muy a menudo en los Estados Unidos, existe otro enfoque que es común en Europa. La formulación alternativa es:

$$\left(\frac{v}{v_0}\right) = \frac{\ln(H/z)}{\ln(H_0/z)} \quad (2.7)$$

donde z se conoce como la longitud de rugosidad.

La Tabla 2.3 presenta clasificaciones de rugosidad y longitudes de rugosidad. Algunos prefieren la ecuación 2.7 ya que tiene una base teórica en aerodinámica, mientras que 2.6 no.

Tabla 2.3: Clasificación de rugosidad

Aspereza	Clase	Longitud de rugosidad z (m)
0	Superficie de agua	0.0002
1	Áreas abiertas con algunos cortavientos	0.03
2	Terrenos con algunos rompevientos más de 1km de distancia	0.1
3	Distritos urbanos y tierras de cultivo con muchos cortavientos	0.4
4	Densidad urbana o bosque	1.3

Obviamente, tanto la formulación exponencial en 2.6 como la versión logarítmica de 2.7 solo proporcionan una primera aproximación a la variación de velocidad del viento con elevación. En realidad, nada es mejor que las mediciones reales del sitio [22].

La Figura 2.3 muestra el impacto del coeficiente de fricción en la velocidad del viento suponiendo una altura de referencia de 10 m, que es una elevación estándar comúnmente utilizada para un

anemómetro. Como se puede ver para una superficie lisa ($\alpha = 0,1$), el viento a 100 m es solo un 25 % más alto que a 10 m, mientras que para un sitio en una "ciudad pequeña" ($\alpha = 0,3$), se estima que el viento a 100 m es el doble que a 10 m.

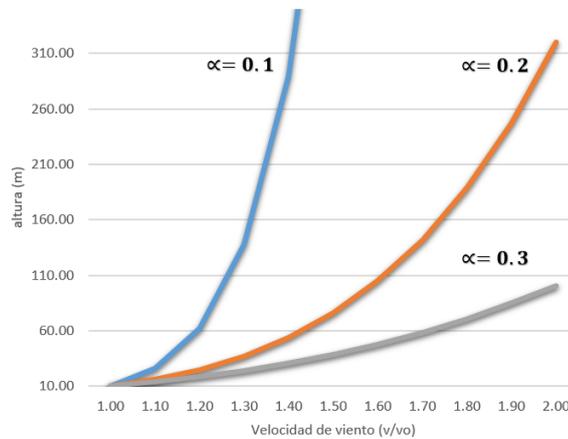


Figura 2.3: Impacto de la altura de la torre

2.5. Límite de Betz

Es interesante observar que varias tecnologías energéticas tienen ciertas limitaciones fundamentales que restringen la máxima eficiencia de conversión posible de una forma de energía a otra. Para motores térmicos, es la eficiencia de Carnot la que limita el trabajo máximo que puede obtenerse de un motor que funciona entre un depósito caliente y uno frío. Para la energía fotovoltaica, es la banda prohibida del material lo que limita la eficiencia de conversión de la luz solar en energía eléctrica. Para las celdas de combustible, es la energía libre de Gibbs la que limita la conversión de energía de formas químicas a eléctricas. Y la restricción que limita la capacidad de una turbina eólica para convertir energía cinética en el viento en energía mecánica, es el límite de Betz.

La derivación original para la potencia máxima que una turbina puede extraer del viento se acredita a un físico alemán, Albert Betz, quien formuló por primera vez relación en 1919. El análisis comienza imaginando lo que le debe pasar al viento cuando pasa a través de una turbina eólica [22].

Cuanto mayor sea la energía cinética que un aerogenerador extraiga del viento, mayor será la ralentización que sufrirá el viento que deja el aerogenerador [20].

El límite de Betz representa la cantidad máxima teórica de potencia que se puede extraer del

viento utilizando una turbina eólica. La suposición fundamental es que el fluido que pasa por la turbina tiene que ir a alguna parte. En otras palabras, si la velocidad del aire se reduce a cero a medida que atraviesa la turbina (lo que significa que la turbina extrae toda la energía cinética del aire), entonces no podría pasar ningún otro aire, sin empujar este aire estacionario, fuera de la turbina. Para que haya un flujo continuo de aire a través de la turbina, parte de la energía cinética del aire no puede extraerse del aire a medida que pasa por la turbina. La pregunta es, ¿Cuánta energía se puede extraer del viento? [23].

Al determinar el límite de Betz se deben establecer algunas suposiciones. En primer lugar, idealizamos la turbina eólica e ignoramos los efectos de arrastre que podrían reducir el límite ideal de Betz en la práctica. En segundo lugar, suponemos que el flujo a través de la turbina es axial y que podemos conservar la masa del aire a medida que fluye a través de la turbina. Por último, suponemos que el flujo es incompresible y la densidad es constante, lo que no es estrictamente cierto para el flujo de aire [23].

En la figura 2.4, la velocidad de viento no perturbado es v , la velocidad del viento a través del plano de las aspas del rotor es v_b , y la velocidad de sotavento es v_d . La tasa de flujo de masa de aire dentro del tubo de flujo está en todas partes igual, llámela \dot{m} . La potencia extraída por las aspas (P_b) es igual a la diferencia en energía cinética entre flujos de aire. Estos son los que van en contra y a favor del viento:

$$P_b = \frac{1}{2} \dot{m} (v^2 - v_d^2) \quad (2.8)$$

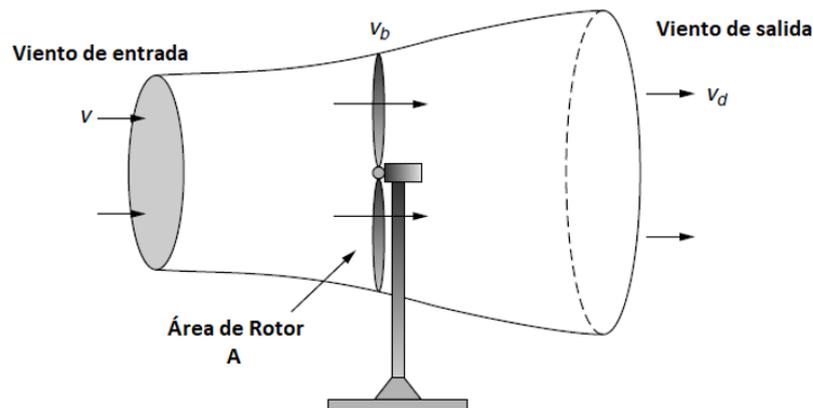


Figura 2.4: El viento que se aproxima se ralentiza y se expande a medida que una parte de su energía cinética es extraída por la turbina eólica, formando el tubo de corriente que se muestra.

El punto más fácil para determinar el flujo de masa \dot{m} es el plano del rotor donde sabemos que



el área de la sección transversal es solo el área barrida del rotor A :

$$\dot{m} = \rho A v_b \quad (2.9)$$

Si ahora se asume que la velocidad del viento a través del plano del rotor es el promedio de las velocidades de entrada y salida, entonces se puede escribir:

$$Pb = \frac{1}{2} \rho A \left(\frac{v + v_d}{2} \right) (v^2 - v_d^2) \quad (2.10)$$

Para hacer más fácil el desarrollo se define que la razón de la velocidad del viento de entrada y salida es λ :

$$\lambda = \left(\frac{v_d}{v} \right) \quad (2.11)$$

Si realizamos la sustitución 2.11 en la ecuación 2.10 se obtiene que:

$$Pb = \frac{1}{2} \rho A \left(\frac{v + \lambda v}{2} \right) (v^2 - \lambda^2 v^2) \quad (2.12)$$

$$Pb = \frac{1}{2} \rho A \left(\frac{v(1 + \lambda)}{2} \right) (v^2 (1 - \lambda^2)) \quad (2.13)$$

$$Pb = \frac{1}{2} \rho A v^3 \left(\frac{(1 + \lambda)(1 - \lambda^2)}{2} \right) \quad (2.14)$$

$$Pb = \frac{1}{2} \rho A v^3 \cdot \left[\frac{1}{2} (1 + \lambda)(1 - \lambda^2) \right] \quad (2.15)$$

La ecuación 2.15 muestra que la potencia extraída del viento es igual a la potencia de entrada en el viento multiplicada por la cantidad entre corchetes. La cantidad entre corchetes es, por lo tanto, la fracción de la potencia del viento que extraen las hélices del rotor; es decir, es la eficiencia del rotor, generalmente designado como C_p .

$$\text{Eficiencia del rotor} = C_p = \frac{1}{2} (1 + \lambda)(1 - \lambda^2) \quad (2.16)$$

$$Pb = \frac{1}{2} \rho A v^3 \cdot C_p \quad (2.17)$$

Para encontrar la máxima eficiencia posible del rotor, se deriva la ecuación 2.16 correspondiente



con respecto a λ y se iguala a cero:

$$\frac{dC_p}{d\lambda} = \frac{1}{2} [(1 + \lambda)(-2\lambda) + (1 - \lambda^2)] = 0 \quad (2.18)$$

$$\frac{dC_p}{d\lambda} = \frac{1}{2} [(1 + \lambda)(-2\lambda) + (1 + \lambda)(1 - \lambda)] = \frac{1}{2}(1 + \lambda)(1 - 3\lambda) = 0$$

Con lo que se puede concluir que:

$$\lambda = \frac{v_d}{v} = \frac{1}{3} \quad (2.19)$$

En otras palabras, la eficiencia de la hélice será máxima si reduce la velocidad del viento a un tercio de su velocidad no perturbada (viento de entrada). Si ahora sustituimos $\lambda = 1/3$ en la ecuación de eficiencia del rotor 2.16, encontramos que la eficiencia teórica máxima de la hélice es:

$$\text{Máxima eficiencia del rotor} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{3}\right) \left(1 - \frac{1}{3^2}\right) = \frac{16}{27} = 0,593 = 59,3\% \quad (2.20)$$

La eficiencia teórica máxima de un rotor es del 59.3%, se conoce como la eficiencia de Betz o, a veces, la ley de Betz. En la Figura 2.5 se muestra la evaluación gráfica de 2.16. Como se puede observar el máximo se produce cuando el viento se ralentiza a un tercio de su flujo entrante.

Para una velocidad del viento dada, la eficiencia del rotor es una función de la velocidad a la que gira el rotor. Si el rotor gira demasiado lento, la eficiencia disminuye ya que las hélices dejan pasar demasiado viento sin ser afectado. Si el rotor gira demasiado rápido, la eficiencia se reduce ya que la turbulencia causada por una hélice afecta cada vez más a la hélice que sigue. La forma habitual de ilustrar la eficiencia del rotor es presentarla en función de su relación de velocidad punta (TSR, por sus siglas en inglés). La relación velocidad-punta es la velocidad a la que se mueve la punta exterior de la hélice dividida por la velocidad del viento:

$$TSR = \frac{\text{Velocidad de la punta del rotor}}{\text{Velocidad de viento}} = \frac{rpm \cdot \pi D}{60 v} \quad (2.21)$$

donde rpm es la velocidad del rotor, en revoluciones por minuto; D es el diámetro del rotor (m); y v es la velocidad del viento (m/s) de entrada a la turbina [22].

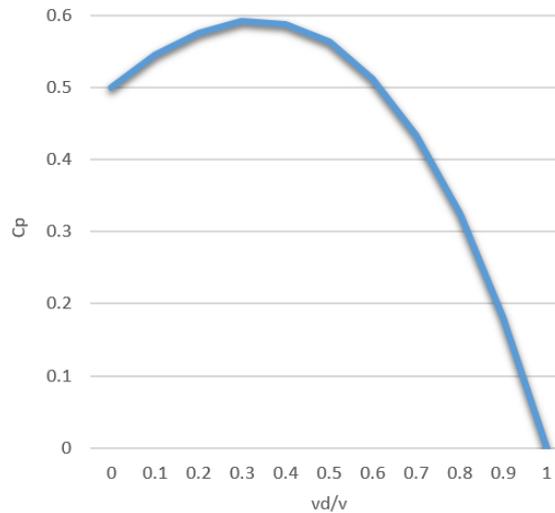


Figura 2.5: Eficiencia máxima de la hélice

En otras palabras, teóricamente es imposible que cualquier aerogenerador extraiga más del 59% de la potencia del viento. Esto se conoce como el límite de Betz. Curiosamente, este modelo predice que la velocidad del flujo en la turbina eólica será de dos tercios de la velocidad del viento. Aunque en realidad las pérdidas por fricción hacen que las turbinas eólicas sean 50% eficientes, y es posible canalizar más aire en la corriente para aumentar la eficiencia más allá del límite de Betz (rotores envueltos poco prácticos), el límite de Betz sigue siendo una característica importante de las turbinas eólicas [23].

UNIVERSIDAD DE CUENCA
desde 1867

2.6. Tipos de aerogeneradores

En función de la orientación del eje de giro de la máquina eólica se encuentran dos grandes grupos:

- Aerogeneradores de eje vertical (VAWT, por sus siglas en inglés)
- Aerogeneradores de eje horizontal (HAWT, por sus siglas en inglés)

Mientras que los aerogeneradores VAWT representan el 1% del total de aerogeneradores instalados, los aerogeneradores HAWT son los más extendidos con un 99% del total instalado. A su vez dentro de los aerogeneradores de eje horizontal la opción más utilizada es la configuración tripalas [24]. Ejemplos de los dos tipos de aerogeneradores se muestran en la Figura 2.6.

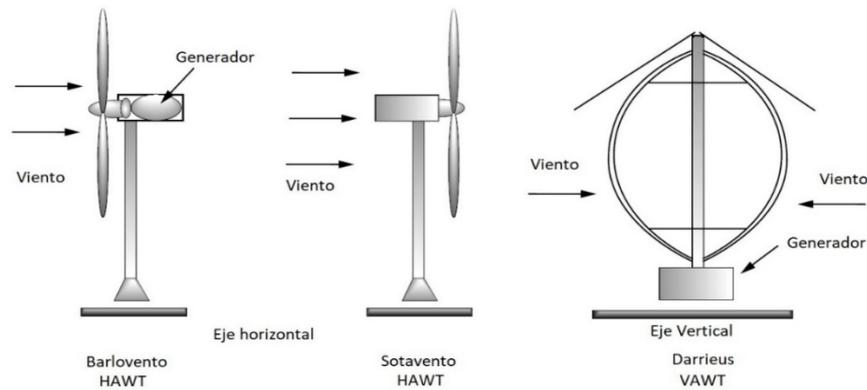


Figura 2.6: Tipos de turbinas de viento

La única máquina de eje vertical que ha tenido éxito comercial es el rotor Darrieus, llamado así por su inventor, el ingeniero francés G. M. Darrieus, quien desarrolló las turbinas por primera vez en la década de 1920. La principal ventaja de las máquinas de ejes verticales, como el rotor Darrieus, es que no necesitan ningún tipo de control de guiñada para mantenerlas orientadas hacia el viento. Una segunda ventaja es que la maquinaria pesada contenida en la góndola (la carcasa alrededor del generador, caja de engranajes y otros componentes mecánicos) se puede ubicar en el suelo, donde se puede reparar fácilmente. Dado que el equipo pesado no está ubicado en la parte superior de una torre, la torre en sí no necesita ser estructuralmente tan resistente como para un HAWT. Las hélices de un rotor Darrieus giran casi siempre en tensión pura, lo que significa que pueden ser relativamente livianas y económicas ya que no tienen que soportar la flexión constante asociada con las hélices en las máquinas de eje horizontal [22].

Hay varias desventajas de las turbinas de eje vertical, la principal es que las hélices están relativamente cerca del suelo donde las velocidades del viento son más bajas. Como se vio anteriormente, el poder en el viento aumenta como el cubo de velocidad, por lo que hay un incentivo considerable para subir las hélices a las velocidades más rápidas que existen en la altura. Los vientos cerca de la superficie de la tierra no solo son más lentos sino también más turbulentos, lo que aumenta el estrés en las VAWT. Finalmente, en los vientos de baja velocidad, los rotores Darrieus tienen muy poco par de arranque; en vientos más fuertes, cuando la potencia de salida debe controlarse para proteger el generador.

Si bien la mayoría de las turbinas eólicas son del tipo de eje horizontal, todavía existe cierta controversia sobre si una máquina en contra del viento o una máquina a favor del viento es la mejor. Una máquina en sotavento tiene la ventaja de dejar que el viento controle la guiñada (el movimiento de izquierda a derecha) para que se oriente de forma natural con respecto a la dirección del viento. Sin embargo, tienen un problema con los efectos de sombreado de viento de la torre. Cada vez que una hélice se balancea detrás de la torre, se topa con un breve período



de viento reducido, lo que hace que la hélice se flexione. Esta flexión no solo tiene el potencial de provocar fallas en la hélice debido a la fatiga, sino que también aumenta el ruido de la hélice y reduce la potencia de salida [22].

Las turbinas de viento contrario, por otro lado, requieren sistemas de control de derrape algo complejos para mantener las aspas frente al viento. A cambio de esa complejidad añadida, sin embargo, las máquinas en contra del viento operan más suavemente y entregan más potencia. Otra decisión de diseño fundamental para turbinas eólicas se relaciona con la cantidad de aspas giratorias. Las turbinas eólicas con muchas aspas funcionan con una velocidad de rotación mucho más baja que las que tienen menos aspas. A medida que los rpm de la turbina aumentan, la turbulencia causada por una hélice afecta la eficacia de la hélice que sigue. Con menos hélices, la turbina puede girar más rápido antes de que esta interferencia sea excesiva. Y un eje giratorio más rápido significa que los generadores pueden ser físicamente más pequeños en tamaño.

La mayoría de las turbinas eólicas europeas modernas tienen tres aspas de rotor, mientras que las máquinas estadounidenses tienden a tener solo dos. Las turbinas de tres aspas muestran una operación más suave ya que los impactos de la interferencia de la torre y la variación de la velocidad del viento con la altura se transfieren más uniformemente desde los rotores al eje de transmisión. También tienden a ser más silenciosos. La tercera hélice, sin embargo, aumenta considerablemente el peso y el costo de la turbina. Un rotor de tres aspas también es algo más difícil de elevar hasta la góndola durante la construcción o el reemplazo de la hélice.

El presente proyecto se centra en analizar la fatiga de las hélices de una turbina de eje horizontal, debido a que son los tipos de turbinas eólicas más utilizadas a nivel mundial [22].

2.6.1. Aerogeneradores de eje horizontal

Los aerogeneradores de eje horizontal o HAWT se construyen con un rotor tipo hélice con el eje dispuesto en posición horizontal, su propósito es transformar el movimiento lineal del viento en un movimiento rotatorio que se encargará de impulsar el alternador para producir energía eléctrica.

Este tipo de aerogeneradores tienen que orientarse con la dirección del viento de forma que el eje de giro del rotor se encuentre situado paralelamente a la dirección del viento. Los aerogeneradores de eje horizontal tienen una mayor eficiencia energética debido en parte a la utilización de perfiles alares en sus aspas. Debido a esto se alcanzan mayores velocidades de rotación, por lo que necesitan cajas de engranajes con menor relación de multiplicación de giro. Además, debido a la construcción elevada sobre una torre aprovechan en mayor medida el aumento de la velocidad del viento con la altura [24].

Según la posición del rotor con respecto al viento existen dos tipos de modelos de turbinas de eje horizontal:

- Orientados a barlovento: cuando el rotor está enfocado de frente a la dirección del viento dominante. Se aprovecha de mejor manera la fuerza del viento, ya que no existen interferencias aerodinámicas con la torre, pero necesita de un mecanismo con la capacidad de orientar el rotor hacia el viento (Figura 2.6)
- Orientados a sotavento: Se los denomina así cuando el rotor se encuentra enfocado en sentido contrario a la dirección del viento dominante (Figura 2.6)

2.6.2. Componentes de un aerogenerador

Los componentes principales que constituyen un aerogenerador de eje horizontal se muestran en la Figura 2.7.

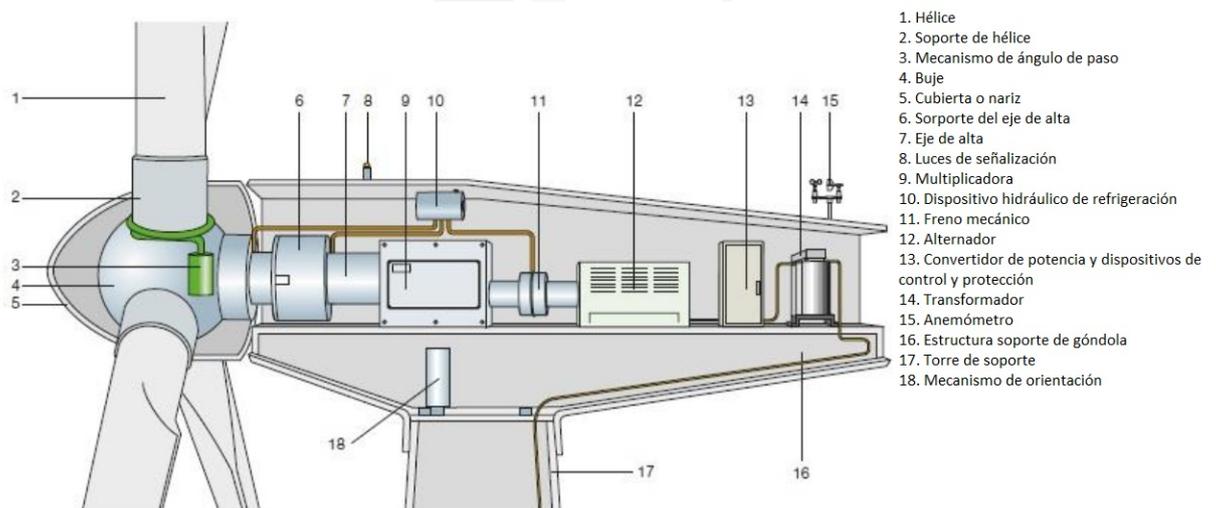


Figura 2.7: Componentes de un aerogenerador

El convertidor y el transformador pueden ubicarse en la góndola lo que hace compensar el peso del rotor o pueden situarse en la parte baja de la torre lo que reduce el tamaño y peso de la góndola. En cuanto a términos de costes la proporción del coste de cada componente en proporción con el coste total se puede observar en la Figura 2.8 [24].

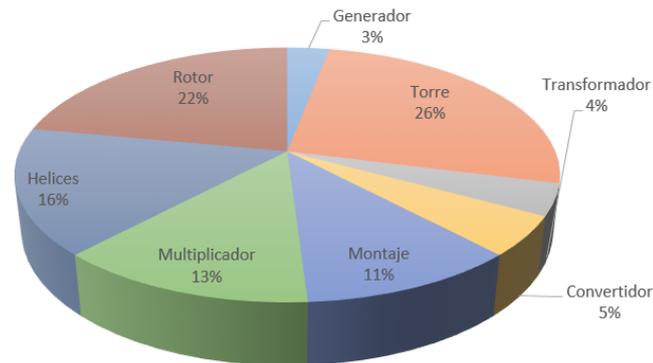


Figura 2.8: Porcentaje de inversión en un aerogenerador [24]

Las Hélices: Estas constituyen una de las partes más importantes, ya que son las encargadas de recoger la energía del viento y convertir el movimiento lineal del viento en movimiento de rotación. Esta energía es transmitida al buje, luego a un sistema de transmisión mecánica, donde la velocidad de rotación es multiplicada y finalmente al generador que transforma el movimiento de rotación en energía eléctrica [24]. Las hélices están elaboradas de un material compuesto de matriz polimérica (poliéster) con un refuerzo de fibras de vidrio o carbono para dar mayor resistencia. Se busca una gran resistencia estructural a la fatiga, ya que estarán expuestos a inclemencias climáticas, fuertes vientos y en los casos de aerogeneradores *offshore* a un alto grado de salinidad.

Las cualidades mecánicas que debe de cumplir el aspa son:

1. Resistencia a fatiga (en particular a tensiones alternas debidas a vibraciones).
2. Tener una resistencia estructural adecuada a las condiciones de trabajo a las que va a ser sometida.
3. Peso bajo.
4. Resistencia a agentes medioambientales (erosión, corrosión) han ido incrementándose en los últimos 20 años.
5. Rigidez.

En aerogeneradores modernos, el perfil transversal de las aspas tiene una geometría capaz de generar una distribución de presiones tal que genere sustentación en una de sus caras, a esto se le conoce como perfil alar. Los perfiles alares en aerogeneradores fueron obtenidos de la aviación donde se encuentran normalizados, en el caso de los rotores eólicos lo más usual es encontrar perfiles NACA llamados así porque fueron normalizados por el Comité Consejero Nacional para la Aeronáutica (*National Advisory Committee for Aeronautics*). La principal ventaja que



presenta el uso de este tipo de perfiles, es la menor oposición que genera el flujo del viento al desplazamiento del ala, esto repercute en una mayor eficacia de la turbina [24].

Buje: Es el elemento en el cual van fijadas las hélices o aspas del aerogenerador y conecta con el sistema de transmisión. En su interior se encuentran los elementos que permiten el cambio de paso, es decir, que permite el giro entre 0° , cuando la velocidad del viento está dentro del rango de operación del aerogenerador y 90° o posición bandera, cuando no se requiere que el buje gire, como una parada de emergencia. A este elemento se le une mediante pernos traccionados o rodamientos de pala, los cuales minimizan el rozamiento de las hélices al girar sobre su propio eje [25].

Cubierta o Nariz: Es un elemento en forma paraboloides que se monta como cubierta frontal. Sirve para desviar el viento hacia el tren motor y mejorar la ventilación en el interior, también para eliminar las turbulencias indeseables en el centro frontal del rotor y para mejorar el aspecto estético [24].

Góndola: La góndola es un cubículo que se puede considerar la sala de máquinas del aerogenerador. Puede girar en torno a la torre para poner a la turbina de cara al viento. Se encuentra acoplada a la torre por una corona dentada para permitir la orientación del rotor al viento. El rotor y las aspas están unidas por el eje principal o de baja velocidad que traslada la fuerza del viento a la multiplicadora y a través de esta al alternador continuamente. En su parte exterior lleva colocado un anemómetro y una veleta conectados a los sistemas de control del aerogenerador, y unos respiraderos para garantizar la refrigeración del alternado [24].

La góndola del aerogenerador protege a todos los componentes mecánicos, de las inclemencias del tiempo, a la vez que aísla acústicamente el ruido generado por la máquina eólica [26].

Caja de engranajes: Los engranajes de las cajas multiplicadoras pueden ser de dos tipos: engranajes rectos o helicoidales. Los primeros se utilizan en cajas multiplicadoras de ejes paralelos y presentan una relación de multiplicación máxima en cada etapa de 1:5. Los engranajes helicoidales tienen un diseño más sofisticado que los engranajes rectos y se emplean en cajas multiplicadoras de tipo planetario. La relación de multiplicación en cada etapa puede ser como máximo de 1:12 [25].

En el diseño de una caja de engranes para aerogeneradores se busca:

- Una relación óptima entre su capacidad de carga, su tamaño y su peso.
- Operar con una eficiencia alta y emitir poco ruido.
- Tamaño compacto.
- Las cajas de engranes deben ser fiables y fáciles de mantener.



Sistema de freno: La instalación de aerogeneradores requiere la dotación de importantes medidas de seguridad que aseguren la integridad de personas y bienes a lo largo de la vida útil de la máquina. Para ello resulta necesario examinar la velocidad del aerogenerador en todo momento, evitando sobrepasar sus límites mecánicos.

Algunos aerogeneradores incorporan frenos aerodinámicos mediante el control de paso en las aspas, mientras que otros necesitan de un sistema mecánico de frenado que limite la velocidad de giro. Algunos aerogeneradores incorporan o no un sistema de frenado activo. Pero siempre es necesario un método independiente de frenado que permita la detención del aerogenerador en cualquier momento o circunstancia (reparación, pérdida de red, motivos de seguridad, etc.)[24].

Generador Eléctrico: El generador es el elemento central del sistema eléctrico de los aerogeneradores y el componente a partir del cual se dimensionan los elementos restantes y sistemas de control y supervisión. En él se realiza la conversión de la energía mecánica disponible en el eje del rotor del aerogenerador, en energía eléctrica.

Los generadores eléctricos se pueden clasificar en dos tipos: de corriente continua o de corriente alterna. Se eligen casi exclusivamente máquinas de corriente alterna, no sólo por su relación potencia/peso más favorable sino por su capacidad de generar a tensiones más elevadas y, sobre todo, porque al no tener colector, presentan unos costes de mantenimiento mucho menores y una disponibilidad muy superior que los generadores de corriente continua. Sólo en el caso de aerogeneradores de pequeña potencia es más usual la utilización de generadores de corriente continua [26].

Sistema de refrigeración: Contiene un ventilador eléctrico utilizado para enfriar el generador eléctrico. Además, contiene una unidad refrigerante por aceite empleada para enfriar el aceite del multiplicador [26].

Sistema de giro: Los métodos de control en un aerogenerador tienen dos importantes funciones, el primero es el aprovechamiento máximo de la fuerza del viento mediante la orientación del rotor, el segundo es la protección del aerogenerador ante velocidades de viento que podrían dañar la instalación. Para la orientación, el aerogenerador cuenta con aparatos anemométricos y veletas para la medida de la dirección del viento instalados sobre la góndola. Los datos almacenados pasan al ordenador de control que, según un algoritmo determinado, decidirá como deberá mover la góndola gracias al sistema de corona dentada y motor de giro instalados en la base de la góndola en su unión con la torre [24].

Veleta y Anemómetro: Todos los aerogeneradores están provistos de una veleta y un anemómetro que se encuentran ubicados en la parte superior de la góndola. El anemómetro sirve para medir la velocidad del viento y la veleta indica su dirección. Los datos recogidos del anemómetro y de la veleta pasan al ordenador de control que según un algoritmo determinado decidirá como



deberá mover la góndola gracias al sistema de corona dentada y motor de giro instalados en la base de la góndola en su unión con la torre [25].

Sistema de control: El sistema de control será diferente en función del tamaño del aerogenerador. Para pequeñas máquinas, el control será simple y normalmente pasivo, por el contrario, para grandes máquinas (media y alta potencia), será más complejo debido a los múltiples parámetros a medir y el aumento de precisión requerido, pero constituirá un coste, que, aunque alto, es pequeño en comparación con el coste total del sistema.

Los objetivos principales de un sistema de control son los siguientes:

- Conseguir que la turbina funcione en armonía con el viento (orientación, control de potencia, etc.).
- Obtener un funcionamiento automático del aerogenerador.
- Proteger al sistema (sobrevelocidades, vibraciones, sobrecalentamientos, enrollamientos de los cables de interconexión).
- Decidir la conexión/desconexión del generador y realizar correctamente los arranques y paradas del aerogenerador.
- Señalizar posibles averías o funcionamientos incorrectos disminuyendo los costes de mantenimiento.
- Maximizar el rendimiento del sistema.
- Aumentar la vida útil del aerogenerador (minimizando las cargas imprevistas que se puedan presentar).

Estas señales (velocidad del viento, orientación, velocidad del rotor, ángulo de paso, temperatura del generador, tensión y corriente de salida, etc.) se expresarán mediante transductores que deberán ser enormemente fiables y precisos, ya que toda la estrategia de control puede ser inútil si las medidas son erróneas [24].

Rotor: Se entiende por rotor eólico el conjunto de componentes del aerogenerador que giran fuera de la góndola. Estos componentes son las hélices, el buje y el mecanismo de cambio de paso del aspa, si lo tuviese [25].

Torre: La torre es uno de los componentes principales de los aerogeneradores de eje horizontal. Es un elemento convencional del aerogenerador, sin embargo, su diseño estructural requiere un conocimiento general del funcionamiento del sistema [25].

Soporta la góndola y el rotor. Generalmente es una ventaja disponer de una torre alta, dado que la velocidad del viento aumenta conforme nos alejamos del nivel del suelo. Una turbina moderna de 600Kw. Tendrá una torre de 40 a 60 metros de altura [26].

Por otra parte, la torre debe presentar una rigidez suficiente para soportar las cargas de empuje transmitidas por el rotor eólico. Además, el diseño estructural de la torre debe fijar su frecuencia propia. Como se indicará posteriormente, el diseño estructural de la torre depende en buena medida de los materiales utilizados en su fabricación [25].

Cimentación: Esta asegura la estabilidad del aerogenerador para todas las condiciones de diseño, y está diseñada para una amplia variedad de terrenos. Consta de anclaje y de la zapata. El anclaje se diseña como continuación de la torre, a la que se atornilla por medio de una brida interior, de manera que transmite los esfuerzos a las zapatas. Este es construido de hormigón en masa, es de planta cuadrada, y está reforzada por una armadura de acero [26].

Control activo por cambio de paso del ángulo de las aspas (control pitch): Mediante un dispositivo mecánico las aspas giran el perfil enfrentado al viento modificando su aerodinámica, de este modo mantiene constante las rotaciones del rotor y así se mantiene constante la entrega de potencia. Es el método más caro, pero también es el que ofrece un mayor control. El ángulo de paso del aspa (β) o *pitch* se define como el ángulo que se forma entre la cuerda del perfil aerodinámico de la aspa y el plano de rotación del rotor (Figura 2.9). Si se varía el ángulo de paso, el ángulo con el que el viento incide sobre el perfil variará, por lo que también lo harán las fuerzas de resistencia y sustentación, encargadas de generar la energía eléctrica [24].

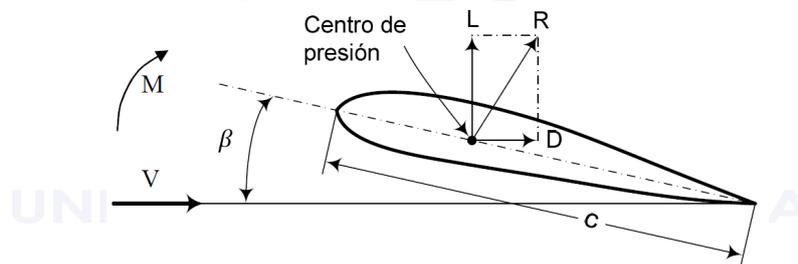


Figura 2.9: Perfil alar

2.7. Sistemas de medición de esfuerzos

La detección de daños de un aspa de turbina eólica permite un mejor funcionamiento de las turbinas y proporciona una alerta temprana para evitar pérdidas catastróficas. Se espera que el monitoreo de la salud estructural (SHM) juegue un papel importante en el desarrollo de grandes aerogeneradores con mayor eficiencia y menor costo de energía [27].

Hay muchas técnicas existentes en uso para evaluar las condiciones estructurales, cada una de las cuales tiene sus propias características y potenciales. Estas técnicas están muy bien docu-

mentadas y están cubiertas por publicaciones donde se etiquetan como técnicas de inspección no destructivas. Las técnicas comunes son las inspecciones visuales, la radiografía, las inspecciones de infrarrojos, las inspecciones térmicas, las inspecciones ultrasónicas, la extensométrica, etcétera. Sin embargo, la mayoría de las técnicas no destructivas se pueden considerar como "técnicas locales" y requieren mucho tiempo. Es decir, solo se puede evaluar un área pequeña al mismo tiempo. Esto genera problemas para identificar qué áreas se deben controlar durante las pruebas. Por lo general, los "puntos calientes" son los lugares donde se desea la monitorización. Sin embargo, cuando se utilizan materiales compuestos, no está claro qué zonas deben inspeccionarse ya que nada es "evidente o predecible". El daño en los compuestos puede aparecer en cualquier parte de la estructura y el crecimiento de las grietas no puede predecirse con las técnicas tradicionales [28].

Tradicionalmente, los extensímetros eléctricos se usan para medir la distribución de esfuerzos de ciertas regiones de cuchillas. Los acelerómetros para medir las respuestas dinámicas y el análisis modal de una cuchilla completa. Los avances técnicos permiten a sensores recientemente emergentes, por ejemplo, sensores de fibra óptica y titanatos de zirconato de plomo (PZT), permiten medir propiedades inherentes de un aspa de una turbina para la detección de daños. En esta sección, estos sensores se presentan brevemente con sus principios operativos y aplicaciones para la detección de daños en las cuchillas [2].

2.7.1. Medidores de deformación convencionales

Los extensímetros convencionales son ampliamente utilizados y fácilmente reconocibles. Típicamente, consisten en un patrón de lámina metálica unida a un soporte flexible no conductor. El soporte que lleva la lámina de metal se une luego a la estructura controlada. Las deformaciones en la estructura se transfieren a la lámina metálica y provocan un cambio en la resistividad eléctrica de la lámina de metal. El cambio en la resistividad se mide mediante un sistema de adquisición de datos conectado localmente, comúnmente mediante el uso de un puente de Wheatstone. Las pruebas estáticas y de fatiga se llevan a cabo rutinariamente como parte del proceso de certificación para aspas de aerogeneradores. Las desventajas de los medidores de tensión convencionales son que son propensos a fallas a largo plazo, incluso cuando están instalados en la raíz del aspa. El cableado de cobre también los hace sensibles a graves perturbaciones eléctricas, como los rayos. Además, los extensímetros convencionales sufren mucho de las perturbaciones del ruido ambiental y no son lo suficientemente sensibles para indicar ciertos tipos de daños en las cuchillas [2].

2.7.2. Sensores de fibra óptica

A diferencia de los medidores de tensión convencionales, los sensores de fibra óptica no son sensibles a las interferencias eléctricas y magnéticas, y son intrínsecamente inmunes a los efectos de los rayos, que ocurren con bastante frecuencia en las aspas de las turbinas. También se consideran precisos, confiables y estables además de su capacidad de multiplexación y facilidad de inserción en las estructuras.

El principio de los sensores de fibra óptica es bastante simple. Los cambios geométricos (tamaño y forma) y ópticos (índice de refracción y conversión de modo) de las fibras ópticas debidos a diversas perturbaciones ambientales se pueden convertir o codificar en cambios correspondientes en las propiedades ópticas de la luz transmitida, como amplitud (intensidad), fase, frecuencia, longitud de onda y polarización.

Con los sistemas de demodulación apropiados, la señal de luz codificada puede emplearse para medir parámetros ambientales externos, tales como tensión, temperatura, humedad, corrosión y aceleración a lo largo de la fibra. Los sensores ópticos de fibra se pueden clasificar en muchos tipos de acuerdo con los parámetros físicos medidos y sus principios operativos.

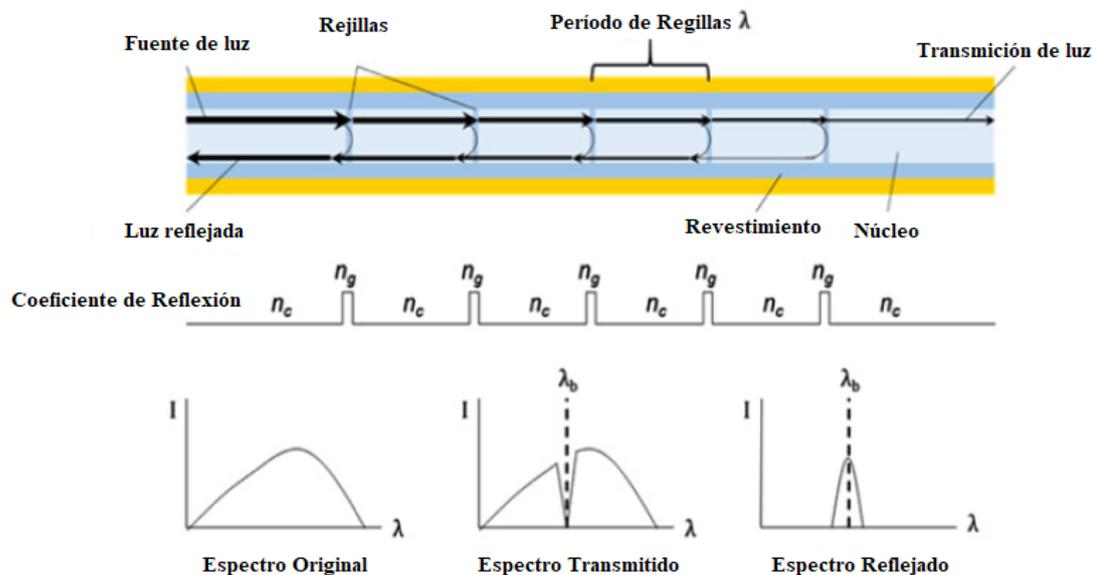


Figura 2.10: El índice de refracción de las rejillas (n_g) es diferente del núcleo (n_c), y se separan periódicamente a la distancia λ . Las longitudes de onda en λ_b se reflejan.[2]

Actualmente, se han aplicado dos tipos de sensores de fibra óptica, a saber, el sensor de rejilla de fibra de Bragg (FBG) y el sensor de desplazamiento de microcurvatura de fibra óptica, en la detección de daños de las aspas de la turbina. Los sensores FBG se crean grabando una pequeña



sección de índice de refracción que cambia periódicamente (cada pico en el cambio de índice de refracción es una rejilla de Bragg) en el núcleo de la fibra usando un patrón de interferencia láser o máscara de fase. En conjunto, basándose en la distancia periódica entre rejillas, se refleja una pequeña banda específica de la longitud de onda del espectro de luz transmitida (Figura 2.10).

Mediante la interrogación de los cambios en la longitud de onda de la luz reflejada, se pueden medir los cambios locales de tensión o temperatura que alteran el índice de refracción del núcleo de la fibra y el período de la rejilla [28].

2.7.3. Acelerómetros

Un acelerómetro usualmente se comporta como una masa amortiguada en un resorte, y mide la aceleración del objeto al que están unidos según la mecánica clásica de Newton. Cuando el objeto experimenta una aceleración, se desarrolla una fuerza dentro del resorte que desplaza la masa, dando como resultado un sistema físico agrupado de segundo orden. Bajo ciertas condiciones de amortiguación y rango de frecuencia, la aceleración de masa es casi directamente proporcional a la amplitud de aceleración del objeto. En dispositivos comerciales, los componentes piezoeléctricos, piezoresistivos y capacitivos se usan para convertir la aceleración mecánica en una señal y la aceleración del objeto se mide proporcionalmente. Los acelerómetros son sensores convencionales utilizados para medir respuestas estructurales en pruebas dinámicas o análisis modales [2].

2.7.4. Sensores emisión acústica (AE)

Los sensores AE se componen típicamente de cristales piezoeléctricos y se caracterizan por un gran ancho de banda. El cristal piezoeléctrico es capaz de convertir energía de esfuerzo mecánico en señales eléctricas de la misma frecuencia. En relación con el SHM de las aspas de turbinas eólicas, las ondas de tensión transitorias de alta frecuencia son a menudo el subproducto de ciertos tipos de daños experimentados por la hélice. El principio de los sensores AE es detectar estas ondas transitorias de estrés por medio de cristales piezoeléctricos y luego interpretarlos en términos de daño que ocurre en el material de una hélice. Los sistemas modernos de adquisición de AE generalmente incluyen convertidores A/D y cuentan con circuitos de extracción para que puedan recibir y analizar una gran cantidad de eventos por segundo, lo que permite capturar e investigar muchas fuentes. Los sensores AE son especialmente adecuados para monitorear ondas de sonido localizadas que se propagan en la superficie de la hélice. Estas ondas sonoras son causadas principalmente por daños en la hélice, tales como rotura, deslaminación, agrietamiento, deformación, despegamiento, impactos, aplastamiento y otros [2].



El aspecto más importante de los sensores de AE, en comparación con otros sensores, es que no requieren una excitación secundaria y artificial del uso en la estructura supervisada. Los sensores AE funcionarán solo para escuchar de forma pasiva ondas de sonido generadas por los cambios de material. Sin embargo, la naturaleza transitoria y la atenuación rápida de AE requieren que los sensores de AE se desplieguen cerca de la ubicación en la que se daña el material, que no se conocen a priori. En el caso de que el daño se realice cerca del sensor, los datos se deben adquirir con una alta tasa de muestreo [2].

2.7.5. Sensores piezoeléctrico (PZT)

Los piezocerámicos son un tipo de material bien conocido. Muchos acelerómetros y sensores AE están hechos de piezocerámicos. PZT, uno de los tipos de materiales piezocerámicos más utilizados en el mundo, exhibe una gama única de propiedades. Una propiedad interesante utilizada para la detección de daños en las hélices es el fuerte efecto piezoeléctrico del PZT. Cuando se deforma un PZT, se genera una carga eléctrica. A diferencia de AE y otros sensores antes mencionados, los PZT pueden funcionar como sensores cuando está sujeto a esfuerzo o tensión (efecto piezoeléctrico) o actuadores cuando está sujeto a una tensión eléctrica (piezoeléctrico inverso) [29].

PZT es de bajo costo y se puede fabricar en cintas u otras formas delgadas diferentes, además de parches cuadrados. En comparación con otros sensores, las ventajas de los sensores PZT incluyen: (1) mayor sensibilidad a los cambios estructurales; (2) idoneidad para geometrías complejas y puede colocarse cerca de las áreas de daño potencial; (3) se puede moldear convenientemente a diferentes formas dependiendo de la aplicación; (4) bajo costo [2].

2.7.6. Sensores de vibrómetro doppler láser (SLDV)

SLDV puede medir el VIB (vibración de base) de muchos puntos en un amplio rango de frecuencias rápidamente sin tener que contactar con la hélice [3]. Un rayo láser del SLDV se dirige a la superficie de un aspa para permitir mediciones sin contacto de los VIB a través del efecto Doppler. El efecto Doppler se refiere al cambio de frecuencia relativa entre la láser fuente y el láser reflejado debido a los movimientos de la superficie de la hélice con respecto a la fuente del láser. Un interferómetro láser interno mide el cambio de frecuencia al interferir el láser reflejado y un láser de referencia. La interferencia resultante es observada por un fotodetector en términos de variaciones en la intensidad de la luz, con la frecuencia de variación correlacionada con la frecuencia del desplazamiento Doppler (Figura 2.11). Al analizar las mediciones del fotodetector, se puede determinar la amplitud VIB y la frecuencia del movimiento de la hélice. Una ventaja significativa de SLDV es su naturaleza no intrusiva sin efectos de carga de masa

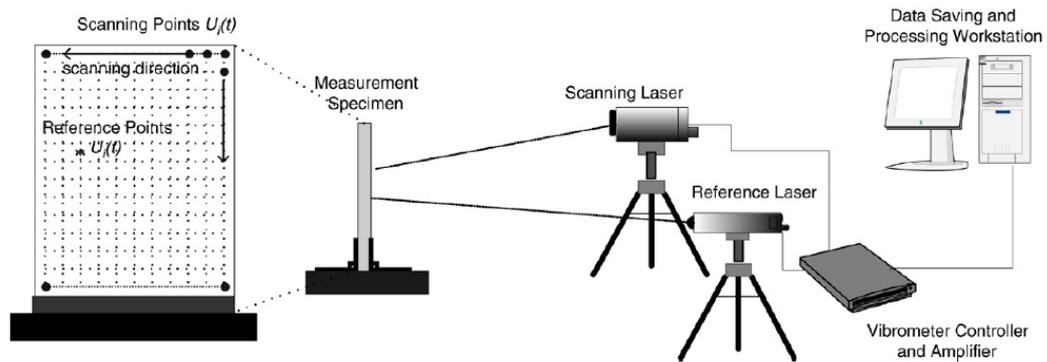


Figura 2.11: Esquemas de adquisición de datos usando el sistema LDV.[3]

y puede obtener formas de deflexión operativa o formas de modo de un aspa de turbina con mayor precisión que los acelerómetros convencionales [2].



Capítulo 3

Diseño del circuito de medición



Este capítulo presenta la descripción del prototipo, tanto la parte física como la parte de procesamiento y acondicionamiento de la señal proveniente de las galgas extensiométricas.

UNIVERSIDAD DE CUENCA
desde 1867

3.1. Descripción general

Las galgas extensiométricas varían su resistencia interna en función de la deformación presente en el espécimen de prueba. Por lo cual, su valor óhmico varía en escalas muy pequeñas. Es necesario implementar etapas de acondicionamiento para que la medición pueda ser utilizada. La Figura 3.1, muestra el diagrama de bloques correspondiente a cada una de las etapas necesarias para el acondicionamiento de la señal.



Figura 3.1: Diagrama de Bloques del instrumento de medición

El puente de Wheatstone puede tener varias configuraciones (cuarto, medio y puente completo) [30]. En este caso se optó por emplear la configuración de puente completo, es decir, cuatro galgas extensiométricas. La configuración de cuatro galgas es ubicada estratégicamente sobre el aspa, de tal manera que la medición obtenida, corresponda a la deformación máxima presente en la misma. La configuración de puente completo, posee una alta sensibilidad y compensación de la temperatura [30], razones por las cuales se optó por ocupar esta configuración.

Cuando se instala un puente es poco probable que el puente se encuentre balanceado [31]. Pequeñas variaciones en la resistencia de los brazos y puntas del puente generan un voltaje de *offset* inicial. Para ello es necesario un método que permita el balance del puente. El método elegido para cumplir esta función consiste en implementar un circuito electrónico. El circuito consiste en implementar una resistencia y un potenciómetro a uno de los brazos del puente. Esto permite que uno de los brazos se ajuste al otro, logrando así equilibrar el puente de Wheatstone.

Debido a que el voltaje de salida del puente de Wheatstone, está en el orden de μV y mV , es necesario ocupar un amplificador de instrumentación. Existe una gran variedad de amplificadores de instrumentación dentro de la familia de *Analog Devices*. El amplificador AD8221 ofrece un bajo offset y alta frecuencia de factor de rechazo al modo común (CMRR, por sus siglas en inglés). Lo cual lo convierte en un excelente candidato para mediciones de puentes de Wheatstone.

Finalmente, la salida del amplificador de instrumentación atraviesa un filtro paso bajo, con la intención de rechazar el ruido, así como evitar el aliasing de las señales de alta frecuencia. De acuerdo al Teorema de Nyquist, este filtro debe tener una frecuencia de corte igual a la mitad de la frecuencia de muestreo. Esta frecuencia también dependerá del conocimiento que se tenga de las señales de entrada y del tratamiento que se le quiera dar. Para nuestro caso establecimos

una frecuencia de corte de 1Khz. El procesamiento de la señal consiste en la lectura de la información. En este caso la información es del tipo analógica, entre un rango de 0-5V. Para ello se optó por emplear una placa Arduino, debido a su entorno de programación de alto nivel. Además, simplifica el proceso de trabajo. El sistema de medición y el módulo Arduino, son alimentados con un voltaje de 5V.

3.2. Descripción de circuitos y componentes

3.2.1. Puente de Wheatstone

El puente de Wheatstone está conformado por cuatro galgas, es decir, se está empleando la configuración de puente completo. En la Figura 3.2, se muestra la configuración de las galgas.

Características:

- Resistencia: $349.8\Omega \pm 0.1\Omega$
- Factor de Galga: 2.0-2.20
- Dimensiones: 7 x 4.5 mm

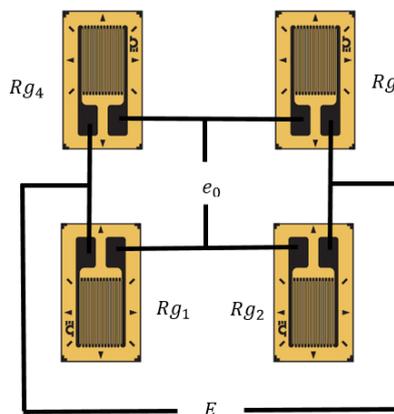


Figura 3.2: Puente completo Wheatstone

donde e_0 corresponde a la salida del puente (mV- μ V), mientras que E es el voltaje de alimentación, típicamente 5V. La salida del puente e_0 , corresponde a dos terminales (positivo y negativo), estos dos terminales son los que deben ingresar al amplificador de instrumentación.

3.2.2. Balance del puente

La tolerancia en las galgas y el cableado son factores que intervienen para que el puente de Wheatstone se encuentre desequilibrado. Si no existe ninguna carga aplicada sobre el puente, la salida debe ser de 0V, pero debido a los factores anteriormente descritos, el puente tiende a presentar un voltaje inicial diferente de 0V. Existe tres métodos para manejar el voltaje inicial de *offset*: compensación por software, implementación de circuito electrónico y eliminación mediante *buffer* [31].

Para nuestro caso se optó por un circuito electrónico para eliminar el *offset*, el cual usa un potenciómetro para ajustar físicamente la salida del puente a cero. Por ejemplo, la Figura 3.3, ilustra el circuito de eliminación de *offset*. Al variar la posición del potenciómetro (RPOT), se puede controlar el nivel de salida del puente y colocar la salida inicial cercana a los 0v. El valor de RNULL por lo general es colocado en el rango de $1k\Omega$ y $5k\Omega$.

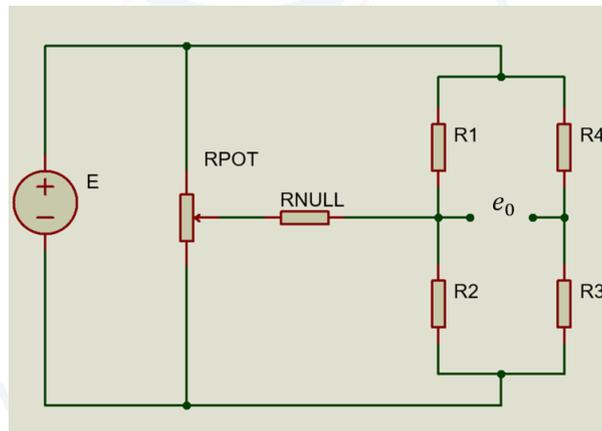


Figura 3.3: Circuito para eliminar el *offset*

3.2.3. Amplificador de instrumentación AD8221

En el acondicionamiento de la señal de las galgas, es indispensable el uso de amplificadores de instrumentación. El AD8221 es un amplificador de instrumentación de alto rendimiento, con ganancia programable que ofrece el factor de rechazo al modo común (CMRR, por sus siglas en inglés) más alto de la industria sobre la frecuencia en su clase. El CMRR de los amplificadores de instrumentación en el mercado hoy en día cae a 200 Hz. A diferencia del amplificador AD8221 mantiene un CMRR mínimo de 80 dB a 10 kHz. La alta frecuencia de CMRR permite que el AD8221 rechace la interferencia de banda ancha y los armónicos de línea, simplificando enormemente los requisitos del filtro. La ganancia programable brinda flexibilidad

de diseño. Una sola resistencia establece la ganancia de 1 a 1000. El AD8221 funciona tanto con suministros simples, como duales y es adecuado para aplicaciones donde se encuentran voltajes de entrada de ± 10 V. El amplificador puede operar en el rango de temperaturas industriales de -40°C a $+85^{\circ}\text{C}$. El amplificador AD8221, consiste en un integrado de 8 pines, como se muestra en la Figura 3.4.

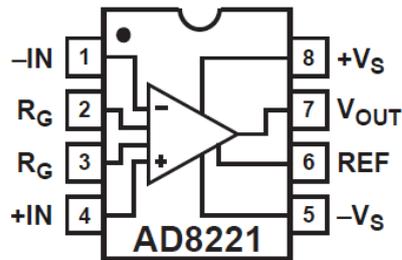


Figura 3.4: Amplificador AD8221

En la Tabla 3.1, se muestra la descripción de cada uno de los pines del amplificador.

Tabla 3.1: Descripción de pines amplificador AD8221.

Número de pin	Nombre	Descripción
1	-IN	Terminal de entrada negativa
2	R_G	Terminal de configuración de la ganancia del amplificador.
3	R_G	Terminal de configuración de la ganancia del amplificador.
4	+IN	Terminal de entrada positiva
5	-Vs	Terminal de fuente de alimentación negativa.
6	REF	Terminal de voltaje de referencia. Mediante una fuente de voltaje de baja impedancia permite cambiar el nivel de la salida.
7	Vout	Terminal de salida
8	+Vs	Terminal de fuente de alimentación positiva.

El circuito recomendado, por el fabricante [32] para adquirir mediciones por parte de las galgas extensiométricas, se muestra en la Figura 3.5.

Al colocar una resistencia en los terminales R_G , se establece la ganancia del amplificador AD8221, que se puede calcular utilizando la ecuación de ganancia:

$$R_G = \frac{49,4K\Omega}{G - 1} \quad (3.1)$$

En este desarrollo se usa un potenciómetro como resistencia variable de $1\text{K}\Omega$. De acuerdo a la ecuación que rige la ganancia, el potenciómetro de un $1\text{K}\Omega$ nos brindaría ganancias entre 50 y 1000 unidades. Para ajustar la referencia se emplea un potenciómetro, como divisor de tensión. Es decir, la salida del amplificador puede ser calibrada en un valor entre 0 y 5V, pero por recomendaciones del fabricante, se estableció una referencia de 2.5V. El terminal de fuente de alimentación positiva $+V_s$, corresponde a 5v, mientras que el terminal de fuente de alimentación negativa corresponde a 0v o GND.

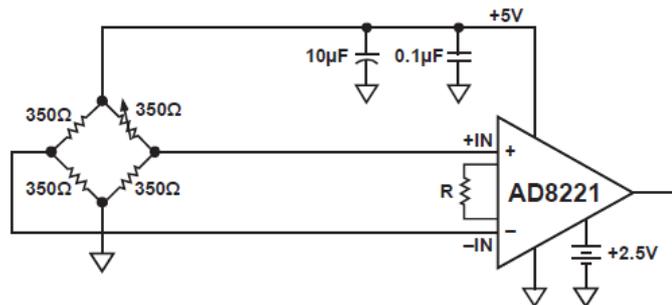


Figura 3.5: Circuito para el uso de galgas extensiométricas. Anexo E

La salida del amplificador V_{out} (pin número 7), es la que ingresa al filtro pasa bajo, para finalmente poder ser procesada y transmitida.

3.2.4. Filtro paso bajo

Para el diseño del filtro se empleó el software *FilterLab*. El filtro a implementar es del tipo Butterworth, paso bajo de ganancia unitaria, estos son los primeros parámetros que se deben indicar en el software, Figura 3.6.

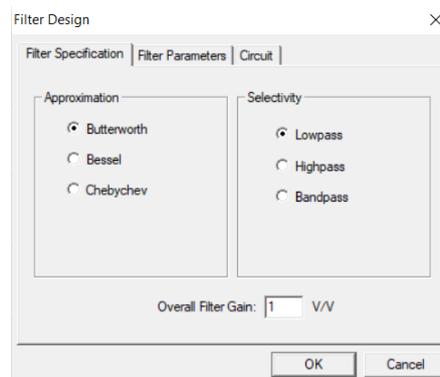


Figura 3.6: Configuración inicial del filtro

Una vez establecido el tipo de filtro, es necesario especificar los siguientes parámetros del filtro:

- Atenuación en la banda de paso: H_a , *Passband Attenuation (dB)*
- Atenuación en la banda de rechazo: H_p , *Stopband Attenuation (dB)*
- Frecuencia de corte: ω_p , *Passband Frequency (Hz)*
- Frecuencia de rechazo: ω_a , *Stopband Frequency (Hz)*

$$H_a = -3dB$$

$$H_p = -80dB$$

$$\omega_p = 1000Hz$$

$$\omega_a = 10000Hz$$

El software nos devuelve, la respuesta en frecuencia del filtro y el circuito electrónico, Figura 3.7 y 3.8, respectivamente.

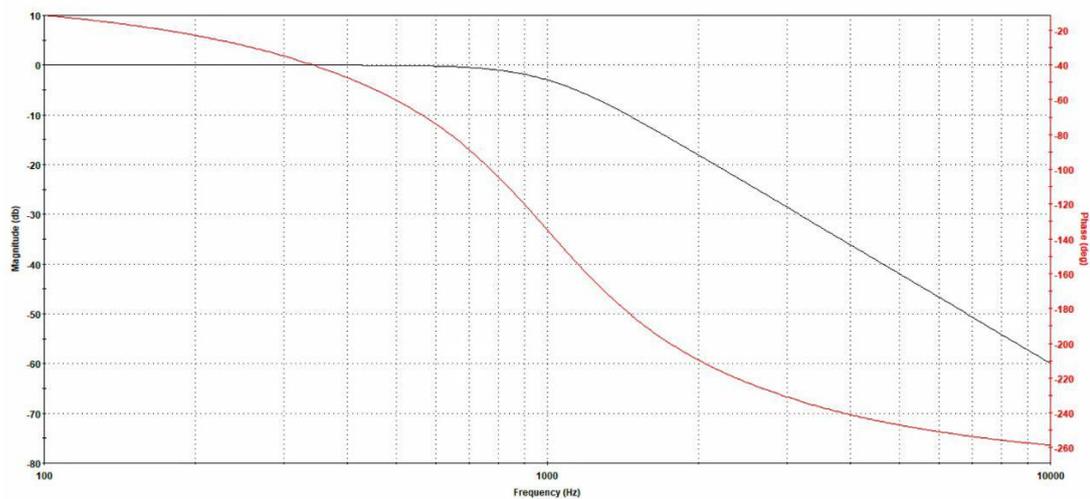


Figura 3.7: Respuesta en frecuencia del filtro

La entrada del filtro paso bajo corresponde a la señal de salida del amplificador AD8221. Finalmente, la salida del filtro es la señal que puede ingresar a cualquier dispositivo o microcontrolador para su procesamiento.

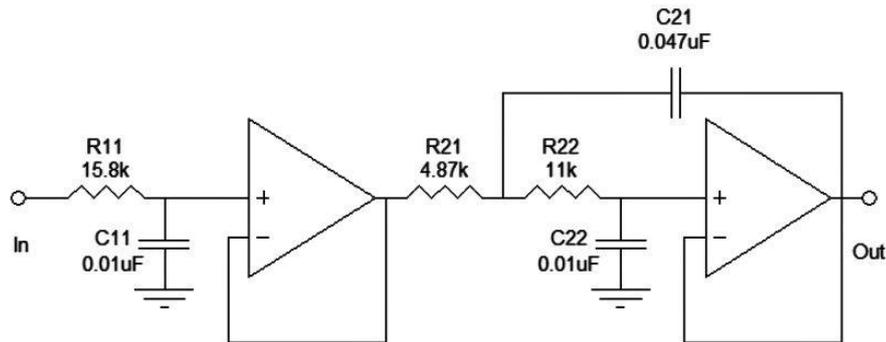


Figura 3.8: Circuito correspondiente al filtro paso bajo

3.2.5. Procesamiento

Para el procesamiento de la información, se empleó un módulo Arduino. Este módulo es el encargado de realizar dos lecturas analógicas comprendidas entre 0V y 5V:

1. Referencia (A0): Esta señal consiste en un valor entre 0 y 5V, pin número 6 (REF) del amplificador. Se estableció un valor de 2.5V, como referencia. Pero puede ser ajustado a cualquier otro valor dependiendo del nivel de voltaje que se desee tener a la salida del amplificador.
2. Medición de la deformación (A1): Esta señal corresponde a la medición útil entregada por el puente de Wheatstone, luego de pasar por un proceso de filtrado. Los niveles de voltaje que alcance esta medición depende del nivel de excitación que se presente en las galgas.

Una vez que se realiza la lectura de los puertos analógicos, se realiza un pequeño procesamiento para que esta información pueda ser enviada por el puerto serial. La comunicación se realiza a una tasa de 9600 baudios, hacia un ordenador donde la información es empleada para visualización y dar la posibilidad de ejercer medidas correctivas.

3.3. Esquema electrónico del circuito de medición

El circuito electrónico del dispositivo de medición se muestra en la Figura 3.9, comprende cada una de las etapas anteriormente mencionadas.

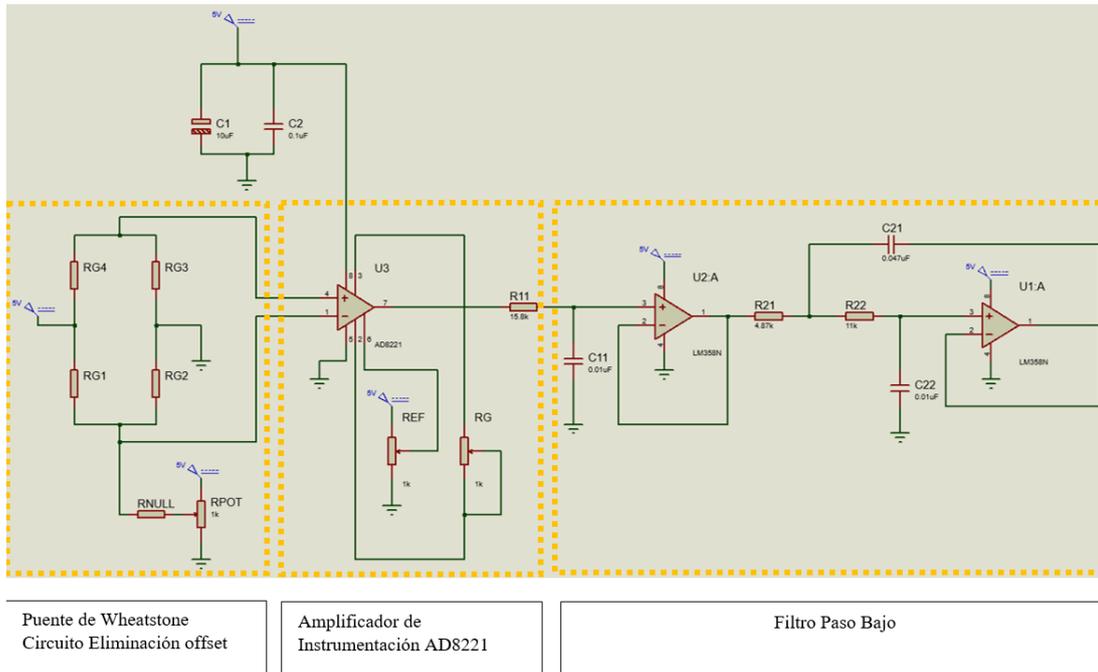


Figura 3.9: Esquema electrónico

3.3.1. Diseño PCB

Para el diseño del circuito impreso (PCB, por siglas en inglés), se considera el esquema electrónico de la Figura 3.9. La mayor parte de los componentes utilizados para el dispositivo de medición son de montaje superficial (SMD, por sus siglas en inglés). La Figura 3.10, muestra el esquema electrónico implementado en el software "Altium Designer". El dispositivo de medición posee como entradas, cuatro borneras, una por cada galga extensiométrica y dos salidas del tipo analógico (referencia, deformación).

La Figura 3.11, muestra el diseño finalizado del PCB. Los *pads* y dimensiones, fueron ajustados mediante la hoja especificaciones de cada uno de los elementos. También se ubica un plano de tierra para reducir ruido y posibles perturbaciones.

Se busca minimizar el espacio, debido a que el PCB debe ser lo más compacto posible. El resultado final conseguido fue un PCB de 50x50mm.

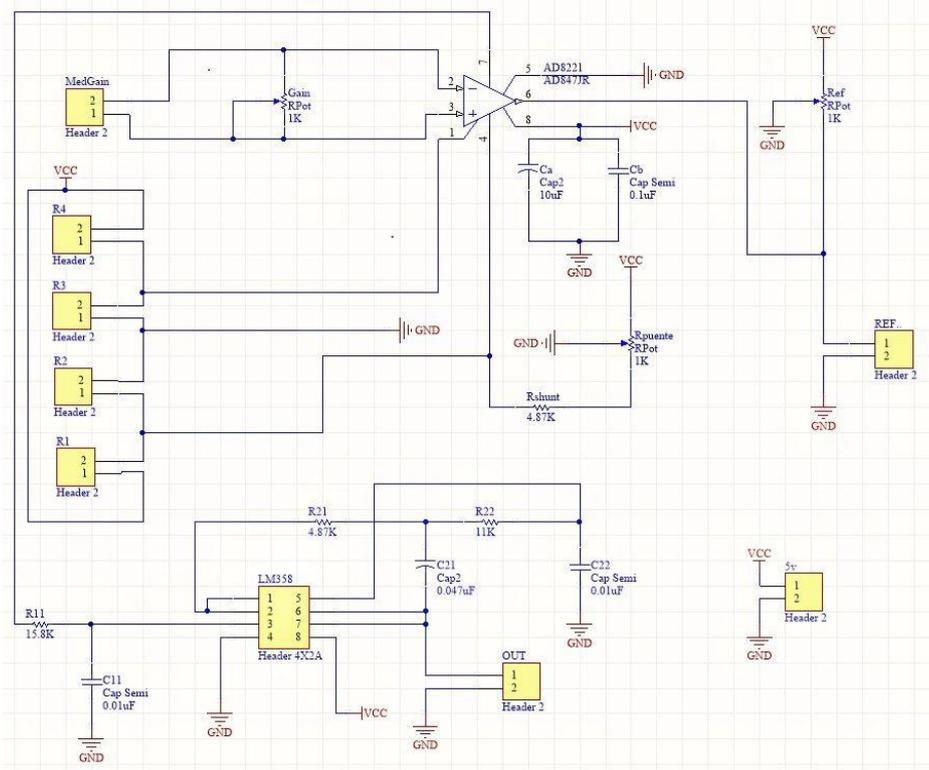


Figura 3.10: Esquema electrónico para el dispositivo de medición

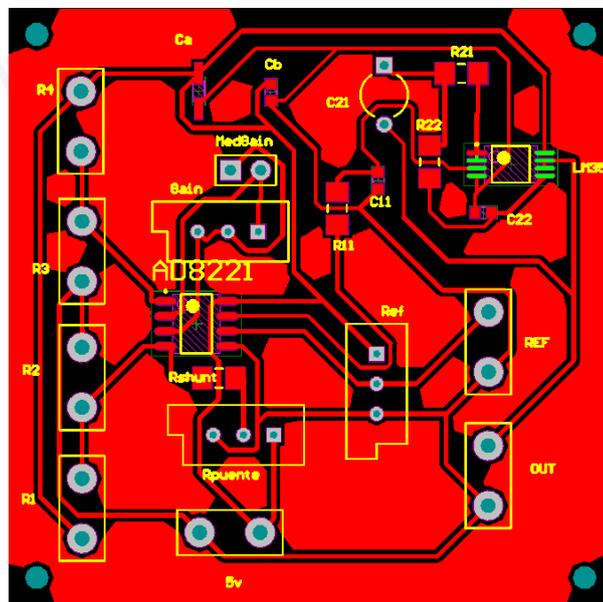


Figura 3.11: Diseño final del PCB

3.4. Estructura del aerogenerador

Para llevar a cabo las mediciones de esfuerzo sobre el aspa, por parte del circuito de medición elaborado, se construyó un pequeño prototipo de aerogenerador. En la Figura 3.12, se muestra el resultado del aerogenerador elaborado. Las aspas tienen una longitud de 74 cm. El *hub*, tiene un diámetro de 17.145 cm, con un espesor de 0.48 cm y un agujero interno de 1.7 cm de diámetro, el cual se acopla al eje principal del aerogenerador. El eje principal del aerogenerador, descansa y gira sobre dos chumaceras. Adicionalmente se acoplo un generador DC de 24V, el cual permitirá verificar el comportamiento del aerogenerador. La rotación es en el sentido de las agujas del reloj.

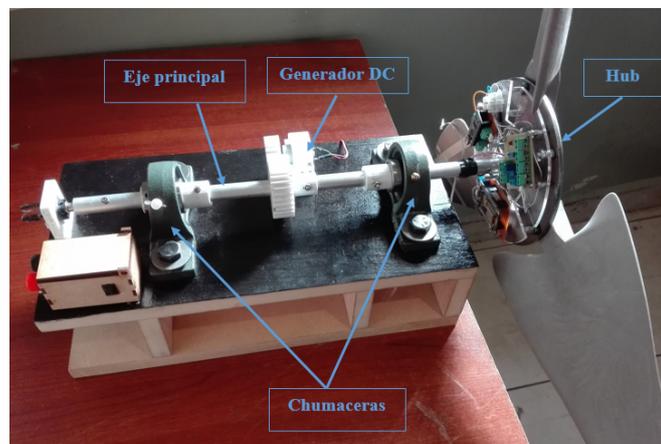


Figura 3.12: Prototipo del aerogenerador

Debido a que el sistema de medición, debe ir sobre la parte giratoria del aerogenerador, se elaboró un disco que sirva de soporte para la instalación de los circuitos necesarios. El disco fue elaborado en acrílico con un espesor de 0.3 cm y con un diámetro de 17cm. En la Figura 3.13, se muestra el diseño del mismo y el montaje de los circuitos. El disco está acoplado de manera paralela al *hub* del aerogenerador, logrando así el montaje de los circuitos necesarios sin alterar la aerodinámica del mismo, como se muestra en la Figura 3.14. Sobre el disco se realizó el montaje de tres PCBs.

1. **Circuito de Medición:** realiza el acondicionamiento de la señal requerido por las galgas extensiométricas.
2. **Módulo ESP8266 (Cliente):** encargado de la transmisión inalámbrica de la información proveniente del circuito de medición.
3. **Módulo Arduino:** encargado de la transmisión serial de la información proveniente del circuito de medición.

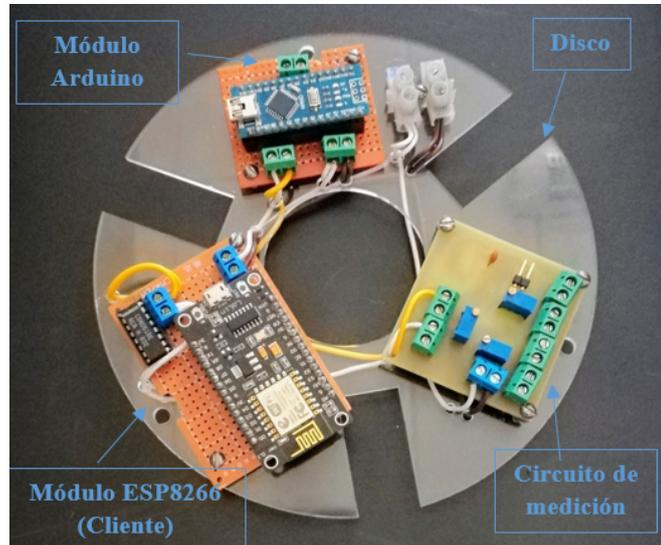


Figura 3.13: Disco de soporte de módulos

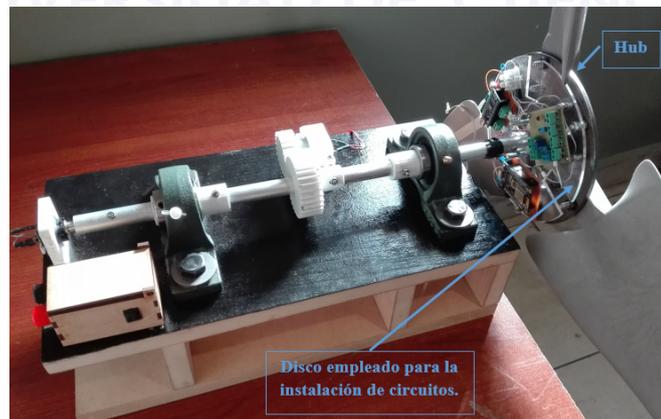


Figura 3.14: Ubicación del disco sobre el *hub* del aerogenerador

3.5. Diseño del sistema de comunicación

Los sistemas de sensores necesitan una fuente de energía y un medio para comunicar su salida. Si los sensores están ubicados en la parte giratoria de la turbina, las conexiones cableadas deben viajar a través de anillos deslizantes. Por otra parte, los sistemas inalámbricos pueden consolidar la salida de varios sensores y transmitir datos utilizando un módem inalámbrico, eliminando la necesidad de líneas de comunicación individuales entre cada sensor y un procesador central de datos [12].

Para el diseño del sistema de comunicación, se optó por ambos métodos: anillos deslizantes y sistema inalámbrico, los cuales son descritos a continuación.

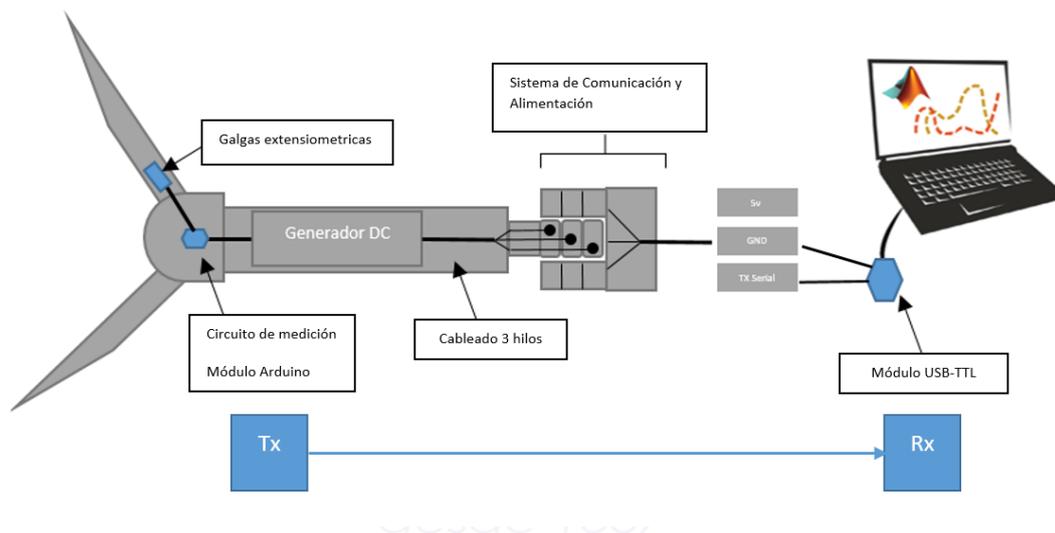


Figura 3.15: Sistema de comunicación mediante anillos deslizantes

3.5.1. Sistema de comunicación mediante anillos deslizantes

El sistema de comunicación mecánico consiste en tres anillos deslizantes, dos de ellos empleados como fuente de alimentación 5V DC y uno de ellos como canal de comunicación. La transmisión de la información es unidireccional, razón por la cual es únicamente necesario un anillo deslizando. En la Figura 3.15, se muestra el esquema general del montaje del sistema de comunicación basado en anillos deslizantes. El módulo Arduino y el circuito de medición están ubicados en el *hub* del aerogenerador. El circuito de medición posee dos salidas analógicas, por lo cual el módulo Arduino es empleado para muestrear las señales analógicas e imprimirlas por el puerto serial a una tasa de 9600 baudios. El receptor consiste en un módulo USB-TTL, el cual está

conectado a un ordenador y mediante el software *Matlab 2016b*, se visualiza de la información transmitida.

En la Figura 3.16, se muestra la implementación del sistema de comunicación mediante anillos deslizantes. En este caso se optó por emplear un conector de audio estéreo macho "plug" de 6.35mm de diámetro. Este conector se encuentra adaptado al eje principal del aerogenerador, razón por lo cual gira en conjunto con el eje. Para capturar la información transmitida y alimentar los circuitos, se empleó un conector de audio estéreo hembra "jack" de 6.35mm. El conector *jack* está ubicado en el extremo final del aerogenerador, de tal manera que se conecta con cada uno de los canales del *plug* instalado en el eje principal del aerogenerador, así como lo muestra la Figura 3.16. De esta manera es posible la recepción de la información y alimentación de los circuitos.

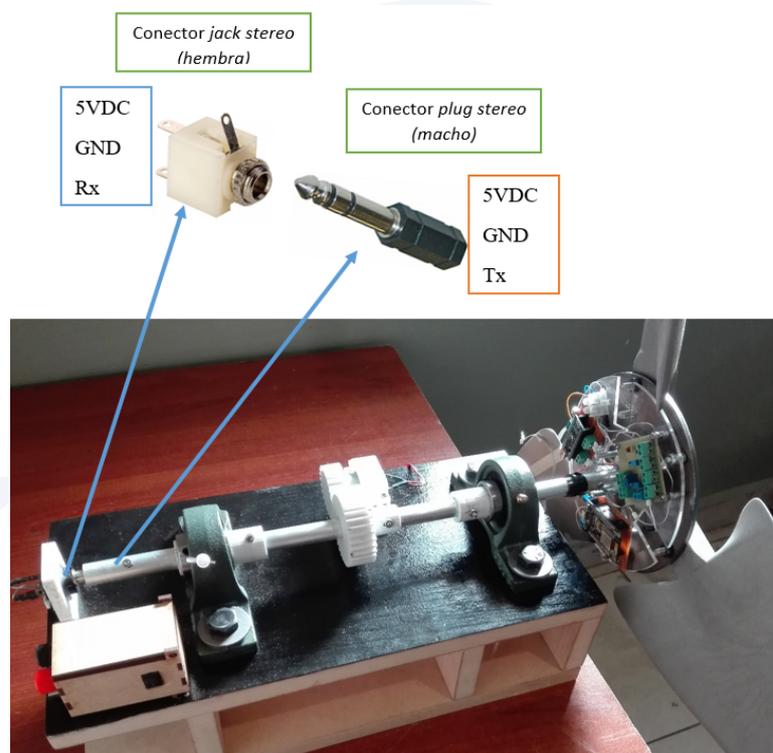


Figura 3.16: Implementación del sistema de comunicación basado en anillos deslizantes

3.5.2. Sistema de comunicación inalámbrico

Para la transmisión de información de manera inalámbrica se empleó el módulo WIFI ESP8266. Es una tarjeta de desarrollo similar a Arduino, especialmente orientada al Internet de las cosas (IoT). Está basado en el SoC (*System on Chip*) ESP8266, un chip altamente integrado. Integra

un procesador con arquitectura de 32 bits y conectividad Wifi. A continuación, se presenta algunas de las características de este módulo (NodeMCU¹):

- Voltaje de Alimentación (USB): 5V DC
- Voltaje de Entradas/Salidas: 3.3V DC
- SoC: ESP8266 (Módulo ESP-12)
- CPU: Tensilica Xtensa LX3 (32 bit)
- Frecuencia de Reloj: 80MHz/160MHz
- Instruction RAM: 32KB
- Data RAM: 96KB
- Memoria Flash Externa: 4MB
- Pines Digitales GPIO: 17
- Pin Analógico ADC: 1
- Protocolo inalámbrico: 802.11 b/g/n
- Wi-Fi Direct (P2P), soft-AP
- Stack de Protocolo TCP/IP integrado
- Potencia de salida de +19.5dBm en modo 802.11b

El circuito de medición posee dos salidas analógicas. Sin embargo, el módulo ESP8266 posee únicamente un puerto analógico, razón por la cual es necesario un multiplexor analógico. El circuito empleado para la lectura analógica, se muestra en la Figura 3.17. El multiplexor analógico es el 40DC51, de 8 canales. Las dos señales analógicas provenientes del circuito de medición, se conectan a los dos primeros canales del multiplexor (X0 y X1). Los tres pines digitales de control del multiplexor (A, B y C), se conectan al módulo cliente (D0, D1 y D2), de esta manera se puede leer el canal analógico deseado.

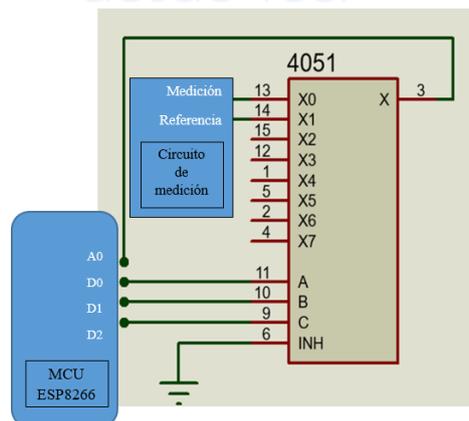


Figura 3.17: Circuito empleado para el multiplexor analógico

¹<http://www.todomicro.com.ar/arduino/223-nodemcu-wifi-esp8266.html>

La arquitectura para la transmisión de la información corresponde a la de cliente-servidor. Ambos módulos ESP8266 se conectan a un enrutador WiFi. Uno de los módulos será un servidor y el otro será cliente. Este último verifica si existe disponibilidad del servidor, para así iniciar la transferencia de la información.

El módulo cliente realiza la comunicación hacia dos servidores:

1. **Servidor local:** Este consiste en un módulo ESP8266. Para que el cliente se pueda conectar con este servidor es necesario conocer la dirección IP y puerto lógico del servidor. Para ello se asignó la dirección IP 192.168.0.101 y puerto 80. Una vez que el cliente detecta disponibilidad por parte del servidor, se inicia la transmisión de la información, la cual consiste en dos valores numéricos (referencia y medición) comprendidos entre (0 y 1023). La tasa de envío de información es de 50Hz. El servidor se encuentra conectado a un ordenador y mediante el software *Matlab 2016b*, es posible la visualización de la información recibida.
2. **Servidor Remoto:** En este caso el cliente se conecta al servidor de Thingspeak, mediante la dirección IP 192.168.184.106, puerto 80. Este servidor permite la visualización de la información de manera remota, cuya arquitectura se muestra en la Figura 3.18. En este caso la información es actualizada cada 15 segundos. Dicha información es subida a la nube de Thingspeak, haciendo posible el monitoreo del aerogenerador de manera remota. El monitoreo se lo puede realizar accediendo a la página web de ThingSpeak² o mediante la aplicación disponible en Android³. El acceso a la información se lo realiza ingresando el ID del canal público ID⁴(= 271170).

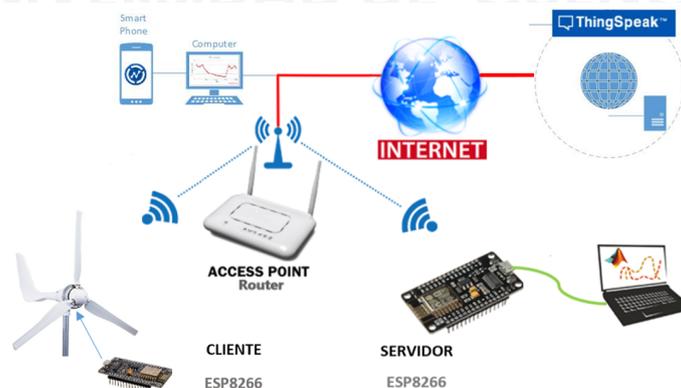


Figura 3.18: Sistema de comunicación inalámbrico

²<https://thingspeak.com/channels/public>

³Play Store: ThingView - ThingSpeak viewer

⁴<https://thingspeak.com/channels/271170>

3.6. Diseño de la interfaz gráfica

Se empleó *Matlab2016b Simulink*, para el diseño de la interfaz gráfica. Esta permite el procesamiento de la información recibida en el puerto serial. La interfaz es válida para cualquiera de los dos sistemas anillos deslizantes e inalámbrico. Los dos dispositivos receptores (USB-TTL y Módulo ESP8266 servidor), se conectan mediante cable USB hacia su respectivo ordenador.

Para la configuración de la comunicación serial, se empleó el bloque *Query Instruments*. Este bloque configura y abre una interfaz para un instrumento, inicializa el instrumento y consulta los datos del mismo. El bloque no tiene puertos de entrada, tiene únicamente un puerto de salida correspondiente a los datos recibidos por el instrumento. Los parámetros de configuración del bloque son los siguientes:

- **Tasa de baudios:** Velocidad a la que se transmiten los bits para la interfaz serial. En este caso se configuró a una tasa de 9600 baudios.
- **Formato de cadena ASCII:** Determina el formato de la cadena texto, entero, flotante, etc. En este caso se configuró como $(\%f, \%f, \%f)$, lo cual indica, que la cadena a recibir consiste en tres números del tipo flotante.
- **Tamaño de la cadena:** Determina la cantidad de muestras en la cadena. Se estableció un tamaño de 3 muestras (referencia, medición y *offset*).

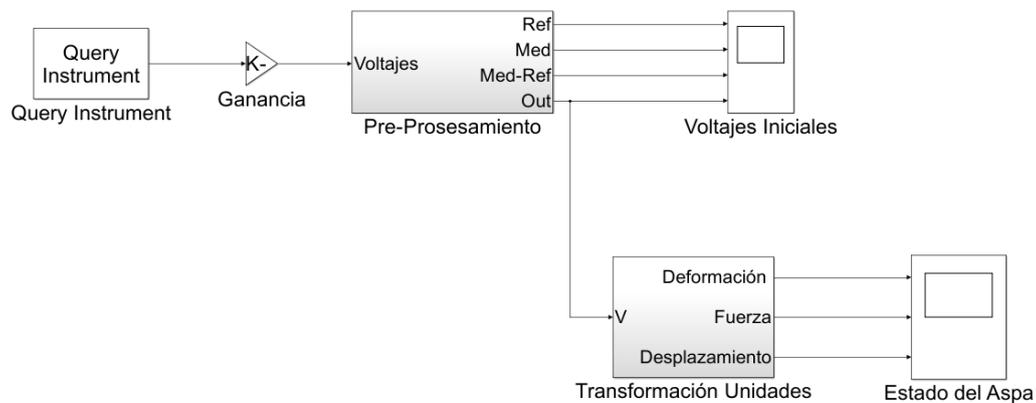


Figura 3.19: Interfaz gráfica

La Figura 3.19, se muestra el diseño de la interfaz, la cual consiste en tres bloques fundamentales:

1. **Ganancia:** Encargado de mapear las muestras (0-1023), a voltios (0-5V).
2. **Pre-procesamiento:** Encargado filtrar la información recibida, mediante un filtro de promediado móvil, con la intención de eliminar el ruido presente en la medición.

- 3. Transformación Unidades:** Dentro de este bloque se encuentran curvas de calibración que permiten el mapeo de voltaje a unidades físicas como masa, distancia y deformación.

3.7. Ubicación de las galgas extensiométricas

Las galgas extensiométricas otorgan medidas puntuales con respecto a la deformación. Por dicha razón se debe encontrar una región sobre el aspa, que corresponda al punto de mayor deformación posible. En [33] se emplearon un total de 30 galgas con el fin de encontrar la región de mayor esfuerzo, dando como resultado que la región de mayor estrés y sensibilidad para las galgas es cercana a la raíz del aspa. Otro método para determinar la localización de los sensores, consiste en emplear simulaciones de la estructura del aspa. La simulación otorga un análisis de tensión y deformación, en donde es visible las zonas de mayor esfuerzo. En [11] y [34], se emplearon simulaciones dando como resultado, que la ubicación de las galgas deben ser en regiones cercanas a la raíz del aspa o en el centro geométrico.

3.7.1. Simulaciones

Para determinar una región de interés sobre el aspa. Se realizó simulaciones en el programa *Autodesk Inventor 2017*. La simulación se basó en realizar una réplica en dimensiones y perfil aerodinámico de dos modelos de aspas, de tal manera que nos permita establecer puntos de interés para la ubicación de las galgas.

Aspa 1

Este primer modelo consiste en un aspa de longitud de 25cm, material de fabricación plástico ABS. El modelo del aspa se muestra en la Figura 3.20.

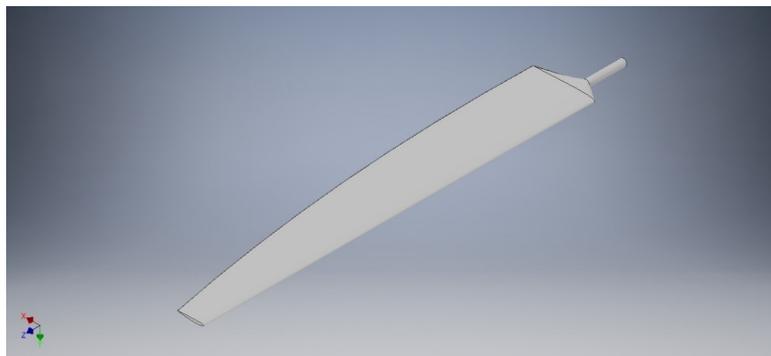


Figura 3.20: Modelo del Aspa 1

El programa empleado permite realizar análisis de esfuerzo sobre el modelo implementado. El resultado consiste en un mapa de esfuerzos, como se muestra en la Figura 3.21. Se puede observar que las zonas con mayor esfuerzo son de color rojo, mientras que las de color azul, representan esfuerzos de menor magnitud.

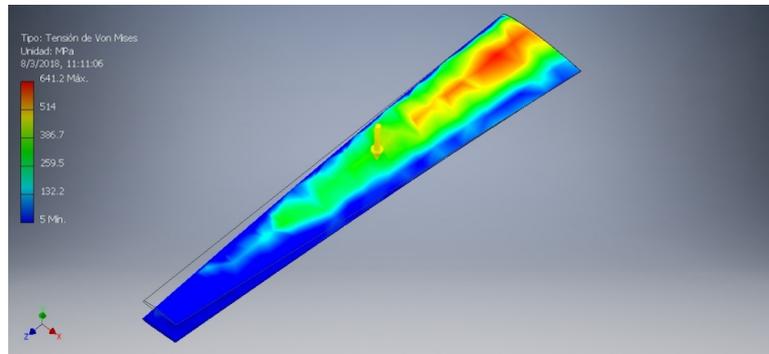


Figura 3.21: Análisis de esfuerzo en Aspa 1

Aspa 2

Este segundo modelo consiste en un aspa de longitud de 74cm, cuyo material de fabricación es fibra de vidrio con cubierta de plástico. El modelo del aspa se muestra en la Figura 3.22.



Figura 3.22: Modelo del Aspa 2

De igual manera se realizó el análisis de esfuerzo, sobre este modelo. En la Figura 3.23, se muestra el mapa de esfuerzos. En este caso la zona de mayor esfuerzo se encuentra cercana a la raíz del aspa y no precisamente sobre la raíz, a diferencia del primer modelo.

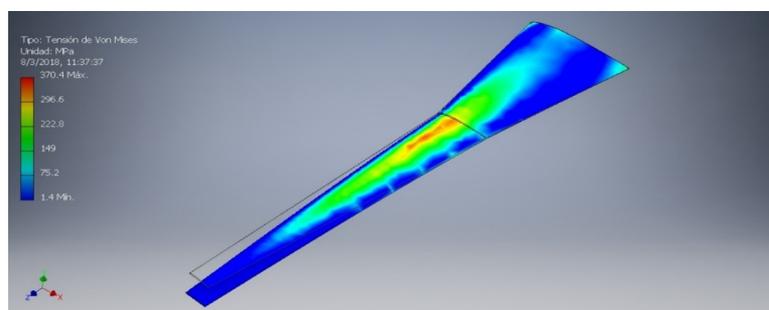


Figura 3.23: Análisis de esfuerzo en Aspa 2

Tomando en cuenta los resultados obtenidos, se decidió establecer una región de interés entre 15cm y 18cm medidos desde la raíz del aspa, como se muestra en la Figura 3.24. Dentro de esta región, se seleccionarán puntos sobre los cuales se ubicarán las galgas, para verificar su respuesta y así poder establecer la ubicación ideal de las mismas.

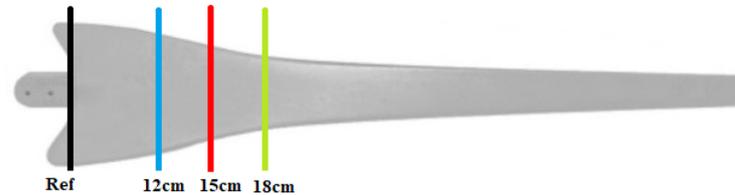


Figura 3.24: Región delimitada para la ubicación de galgas extensiométricas

3.8. Ventilador controlado

Como parte de la simulación del prototipo, se implementó un variador de velocidad para un motor monofásico (ventilador). El cual permite observar el comportamiento del aerogenerador frente a distintas ráfagas de viento. Para esto se diseñó un control de ángulo de disparo, encargado de regular las revoluciones del ventilador. Al modificar las revoluciones del ventilador, es posible obtener velocidades de viento entre 0m/s y 5m/s. Como se puede observar en la Figura 3.25, se precarga una serie de viento, es decir, variaciones de velocidad. Con esto se busca emular ráfagas de viento reales, a las que puede estar sometido un aerogenerador, pero a pequeña escala.

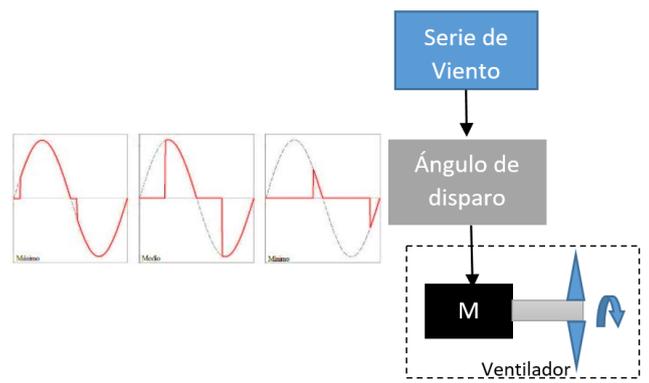


Figura 3.25: Esquema del ventilador controlado



3.9. Análisis de consumo energético

En la Tabla 3.2, se muestra el consumo de corriente de cada uno de los circuitos implementados en el *hub* del aerogenerador. Se puede observar que el Módulo ESP8266, es el que mayor corriente consume, esto se debe a que es necesario emplear una pequeña potencia, para el envío de los datos de manera inalámbrica.

Tabla 3.2: Consumo del sistema de instrumentación

Descripción	Consumo de corriente
Circuito de medición	50mA
Módulo ESP8266	80mA
Módulo Arduino	50mA
<i>Total</i>	180mA



Capítulo 4

Resultados de mediciones efectuadas sobre el aspa

En este capítulo se presenta el método empleado para la calibración de las galgas extensiométricas. Además, se muestran los resultados de las mediciones efectuadas sobre el aspa, bajo distintas velocidades de viento que inciden de manera frontal sobre el aerogenerador. Finalmente, una comparativa entre el estrés que sufre el aspa frente a distintas velocidades de viento y a un diferente ángulo pitch.

4.1. Experimentos estáticos

El análisis realizado en la sección 3.7, nos indica que el segmento del aspa cercana a la raíz, es donde se genera la mayor cantidad de esfuerzo. Esto frente a cargas que inciden de manera perpendicular sobre el cuerpo del aspa. Por esta razón se tomó tres puntos de interés, en los cuales se situaron las galgas, para la captura de datos. Estos tres puntos corresponden a 12, 15 y 18 cm medidos desde la raíz del aspa.

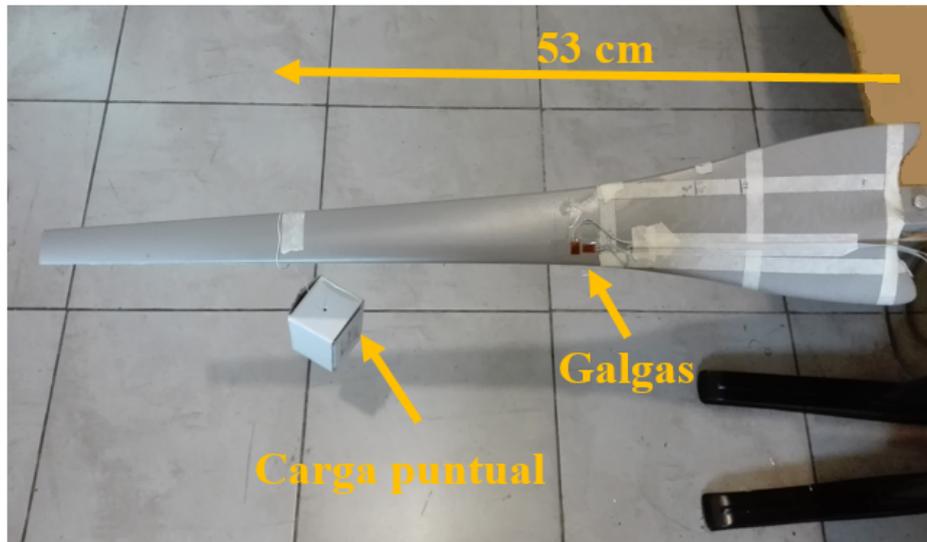


Figura 4.1: Experimento para determinar la fuerza sobre el aspa

El sistema de medición fue puesto a prueba colocando masas puntuales a 53cm de la raíz del aspa. En la Figura 4.1 se muestra la manera en qué se realizó el primer experimento. Este consiste en aplicar cargas puntuales de 200, 300, 400 y 500 gramos, y verificar el voltaje de salida presente en las galgas, con la intención de encontrar un modelo lineal (calibración de galgas) y el punto de mayor sensibilidad.

En la Figura 4.2(a)(b)(c), se muestra los resultados de los tres ensayos realizados. El marcador rojo indica el voltaje capturado y el marcador verde corresponde al resultado de una interpolación lineal basada en polinomio de interpolación único [35]. Este resultado refleja el mapeo entre el voltaje de salida y la carga presente en el aspa medida en gramos. Se puede observar que la mayor sensibilidad se da entre los puntos de 15cm y 18cm, alcanzando un voltaje de 0.15V. También se puede rescatar que la tendencia es lineal, considerando que es una de las características de la configuración de puente completo, el cual es empleado en este proyecto [30].

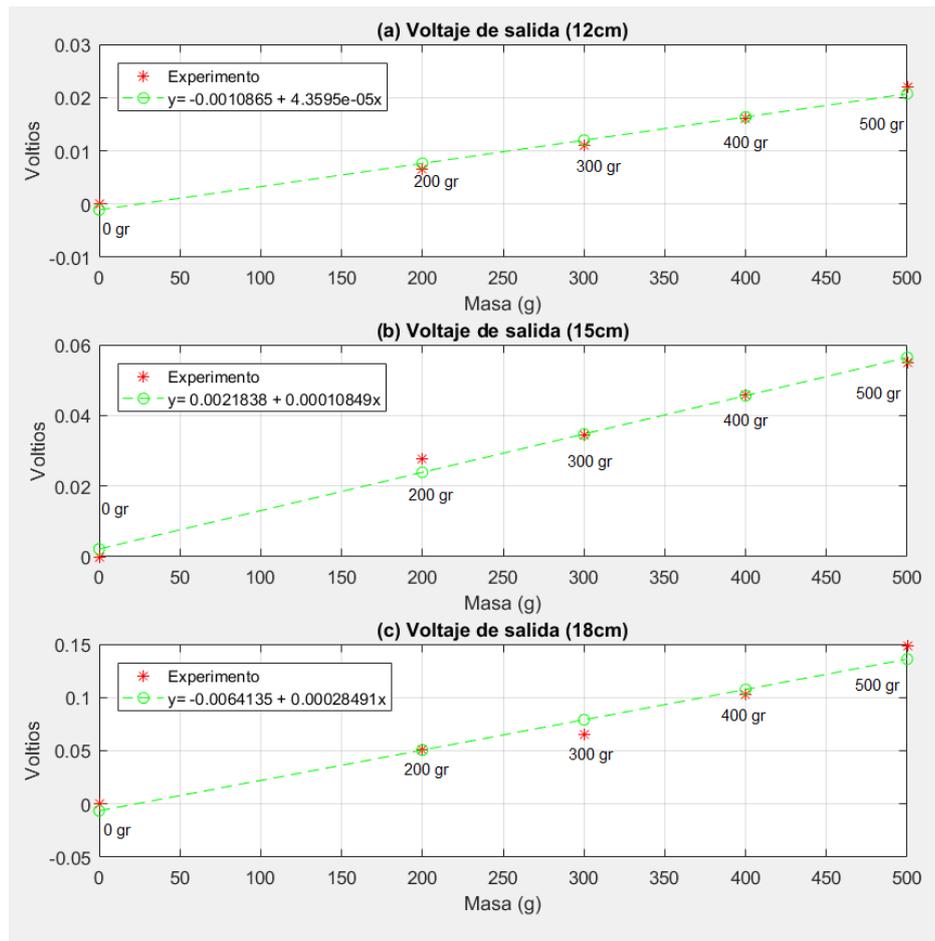


Figura 4.2: Voltaje de salida vs masa

En la Figura 4.3, se muestra un segundo experimento. Este consiste en aplicar cargas fijas, con el fin de capturar el voltaje de salida presente en las galgas y medir el desplazamiento de la punta del aspa en milímetros.

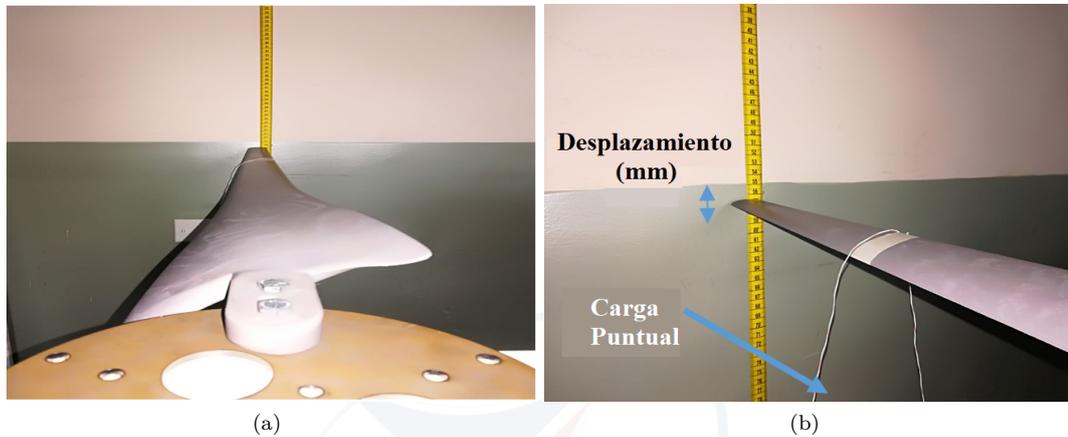


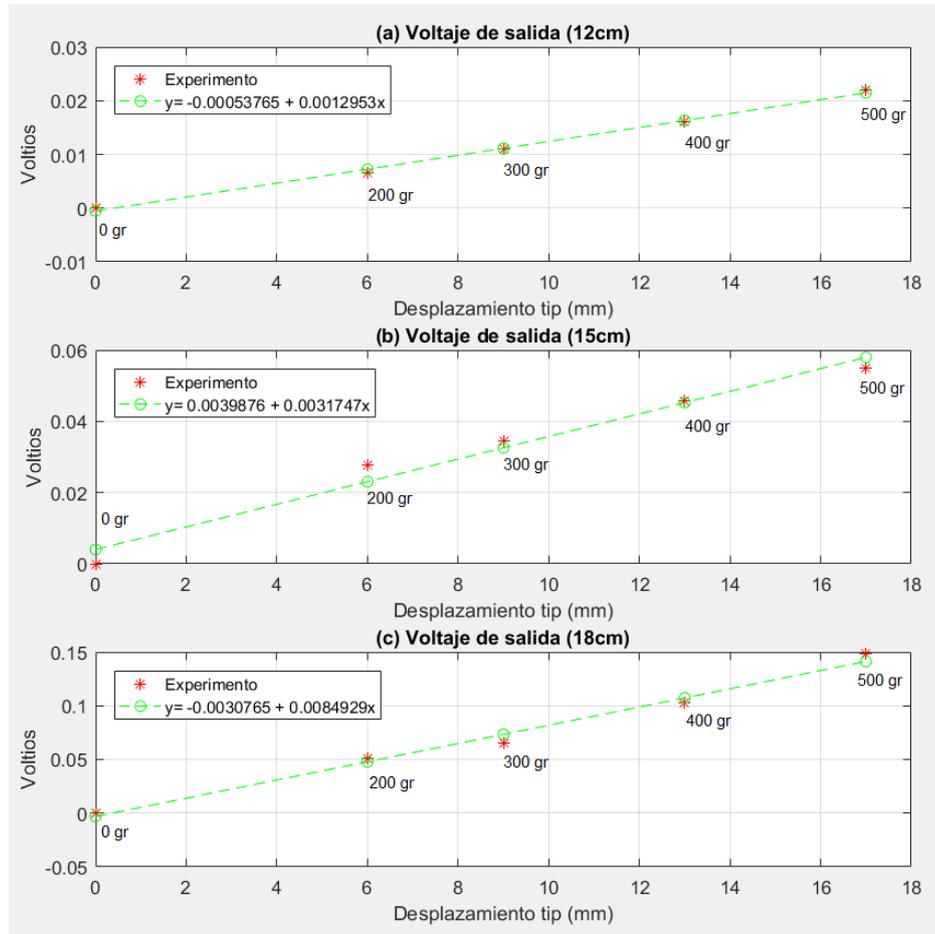
Figura 4.3: Experimento para determinar el desplazamiento de la punta del aspa

La Figura 4.4(a)(b)(c), muestra los resultados de los tres ensayos realizados. Este resultado nos refleja el mapeo entre el voltaje de salida y el desplazamiento de la punta del aspa en milímetros. De igual manera que el primer experimento, el punto más sensible se encuentra a 18 cm de la raíz del aspa.

Estos dos experimentos iniciales realizados tienen la finalidad de encontrar dos modelos lineales:

- **Masa:** modelo lineal que permite mapear el voltaje de salida de las galgas a unidades de masa como gramos, lo cual representa la carga presente en el aspa.
- **Desplazamiento:** modelo lineal que permite mapear el voltaje de salida de las galgas a milímetros, lo cual representa el desplazamiento de la punta del aspa.

Dichos modelos lineales son colocados en el bloque "Transformación Unidades" de la interfaz gráfica elaborada, con la finalidad de mostrar información útil sobre el estado del aspa. Debido a que se realizó tres ensayos y en cada uno se cuenta con modelo lineal, se optó por tomar el modelo con mejor sensibilidad. El modelo lineal a considerar es el obtenido a 18cm de la raíz del aspa.

Figura 4.4: Voltaje de salida vs desplazamiento *tip*

4.2. Experimentos dinámicos

Una vez obtenidos los modelos lineales para el desplazamiento de la punta y carga sobre el aspa, se realizó pruebas sobre el aerogenerador, es decir, el sistema en funcionamiento (rotando). Para los resultados, se implementó un motor que permita el giro de las aspas, como se muestra en la Figura 4.5. También se implementó un control de ángulo de disparo sobre un ventilador, con la intención de variar la velocidad del viento.

La idea general de este experimento es colocar el ventilador a una cierta distancia del aerogenerador (1m), y tratar de asemejar la salida del mismo a una serie de viento, mediante el ángulo de disparo. Con este método es posible observar la respuesta del sistema de medición. Además de verificar el estado del aspa ante el impacto frontal de la serie de viento.

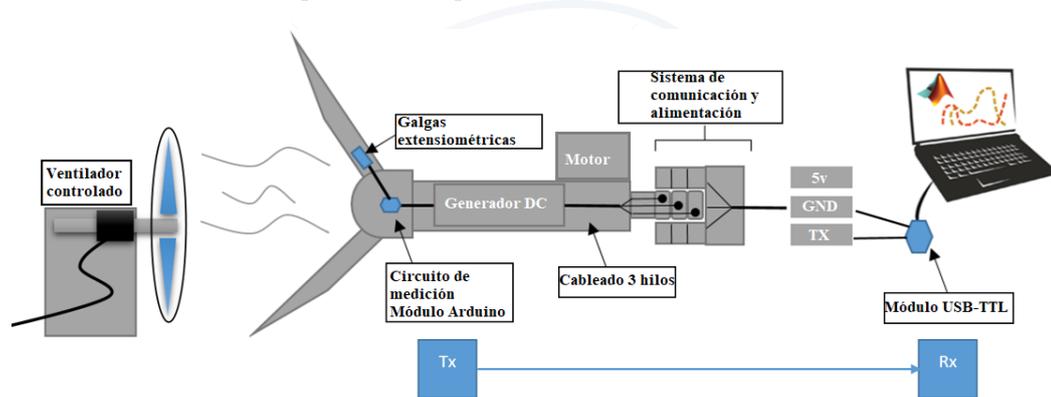


Figura 4.5: Diagrama del experimento sobre el aerogenerador

En cada uno de los siguientes ensayos se muestran entre cuatro y seis gráficas que corresponden a:

- **Salida generador:** corresponde al voltaje de salida debido al movimiento de las aspas.
- **Velocidad de viento:** representa la velocidad del viento, generada por el ventilador.
- **Voltaje de salida:** es el voltaje entregado por el circuito de medición, previamente procesado.
- **Deformación sobre la galga:** consiste en la deformación unitaria.
- **Carga sobre el aspa:** corresponde a la carga sobre el aspa, medida en gramos.
- **Desplazamiento *Tip*:** es el desplazamiento de la punta del aspa, medido en milímetros.

La carga y desplazamiento sobre el aspa, pueden ser valores positivos o negativos. Un valor positivo implica que el aspa esta flexionada hacia la góndola. En cambio, un valor negativo implica que el aspa esta flexionada en sentido opuesto.

Las magnitudes (gramos y milímetros) a observar en cada uno de los ensayos, corresponden a los modelos lineales obtenidos en la sección 4.1.

4.2.1. Ensayo 1

Este primer ensayo consiste en verificar el estado del aspa, cuando el viento incide con una velocidad de 1.5m/s.

Resultados obtenidos mediante anillos deslizantes e interfaz inalámbrica

En la Figura 4.6, se muestra el resultado de las pruebas realizadas sobre el aerogenerador. El aerogenerador parte del reposo por lo que inicialmente no existe carga alguna sobre las aspas. Cuando las aspas empiezan a girar aparecen pequeñas cargas, lo cual implica que la punta del aspa está en constante oscilación. Los resultados obtenidos de manera inalámbrica, son similares a los obtenidos mediante anillos deslizantes.

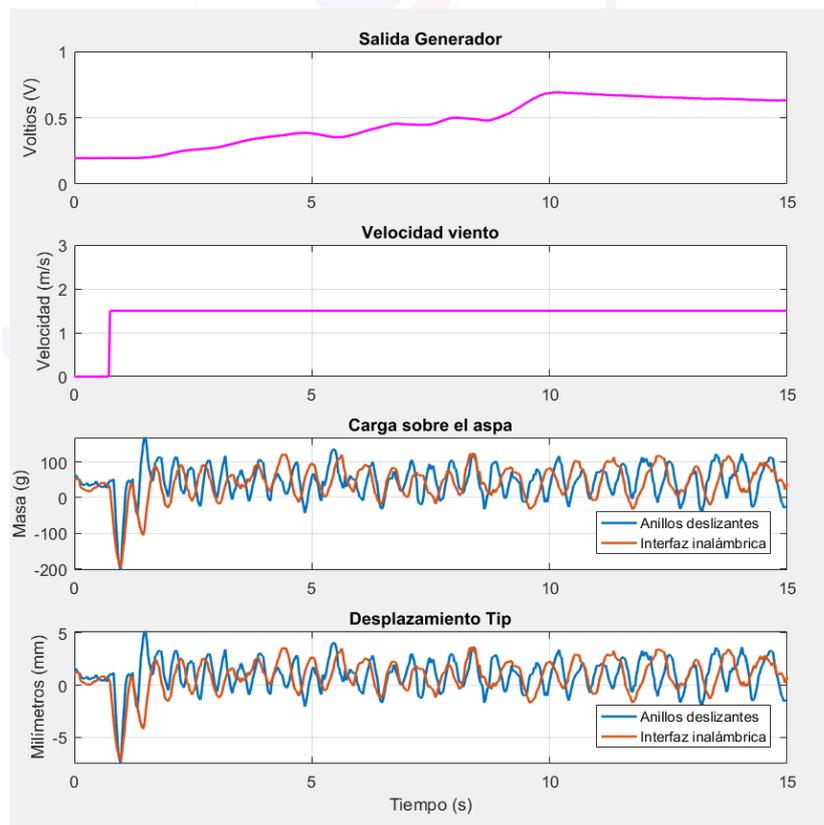


Figura 4.6: Resultados ensayo 1, anillos deslizantes e interfaz inalámbrica

4.2.2. Ensayo 2

Este ensayo consiste en verificar el estado del aspa, cuando la velocidad del viento es de 2.5m/s.

Resultados obtenidos mediante anillos deslizantes e interfaz inalámbrica

En la Figura 4.7, se puede observar que se alcanzan picos de mayor amplitud en comparación al ensayo 1. Esto se debe a que la velocidad del viento es mayor en este ensayo. En la interfaz inalámbrica y en el de anillos deslizantes, el comportamiento de ambas respuestas es similar.

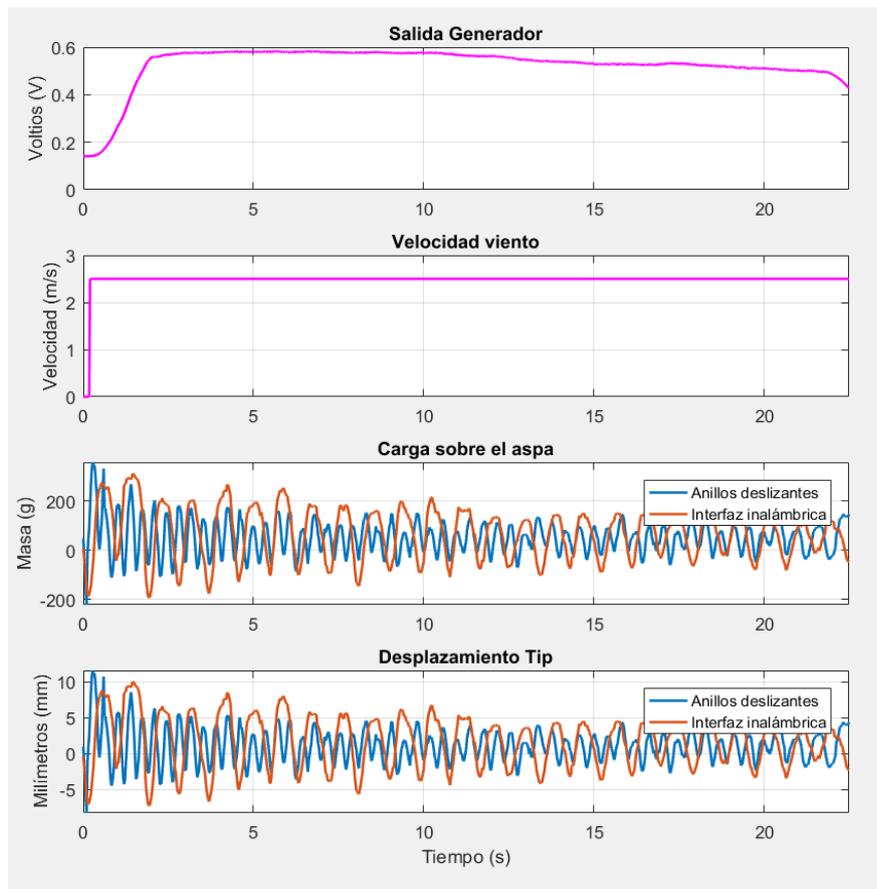


Figura 4.7: Resultados ensayo 2, anillos deslizantes e interfaz inalámbrica

4.2.3. Ensayo 3

Este ensayo consiste en verificar el estado del aspa, ante variaciones de velocidad de viento entre 0m/s y 5m/s.

Resultados obtenidos mediante anillos deslizantes

En la Figura 4.8, se puede observar que, cuando la perturbación incrementa sobre el aspa, esta refleja un pico de desplazamiento alrededor de 20mm y una carga de 800g. Cuando la velocidad del viento disminuye, la carga y el desplazamiento también disminuyen. Además, es notorio que al incrementar la velocidad del viento, este contribuye a que el voltaje de salida del generador también se vea afectado.

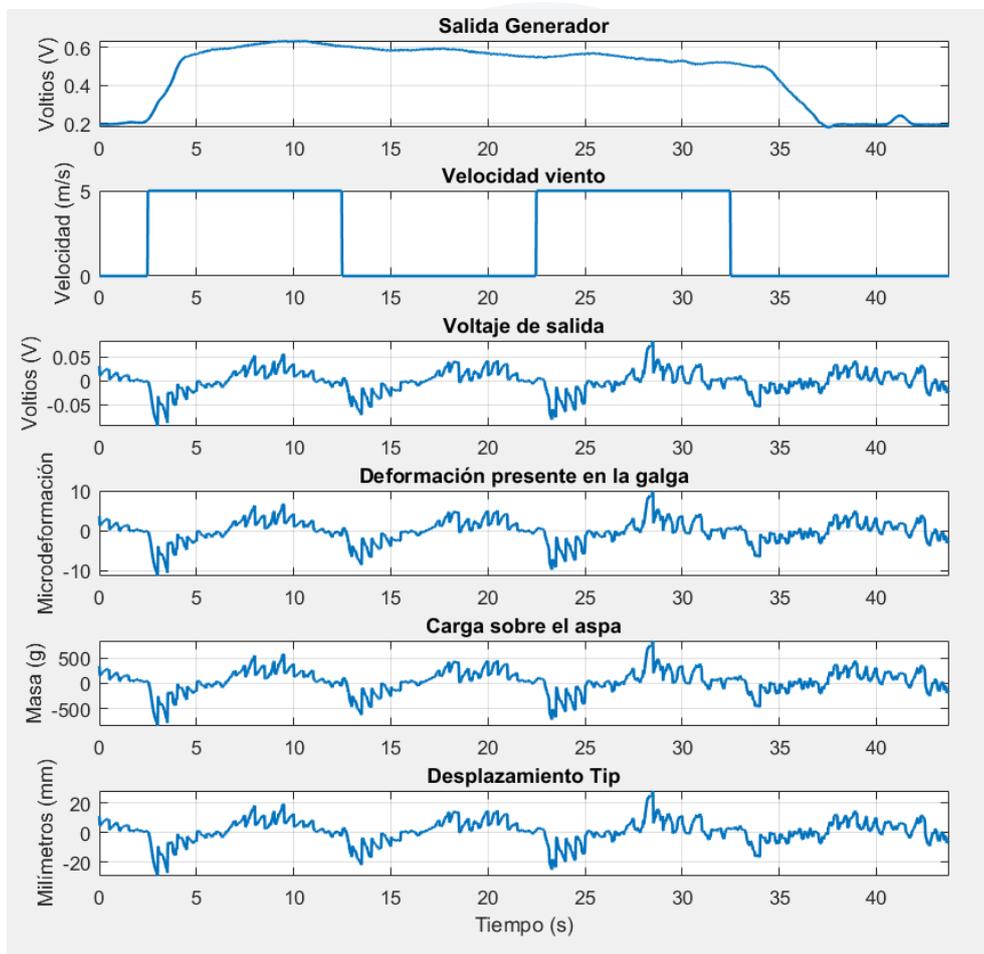


Figura 4.8: Resultados ensayo 3, anillos deslizantes

Resultados obtenidos mediante interfaz inalámbrica

De igual manera que en el caso anterior, existe un pico de carga y desplazamiento sobre el aspa, cuando la velocidad del viento incrementa (Figura 4.9). También se observa que, mientras la velocidad del viento es máxima, la deformación presente en la galga extensiométrica, desplazamiento y carga sobre el aspa, tienden a ser oscilatorias tomando picos de amplitud elevados.

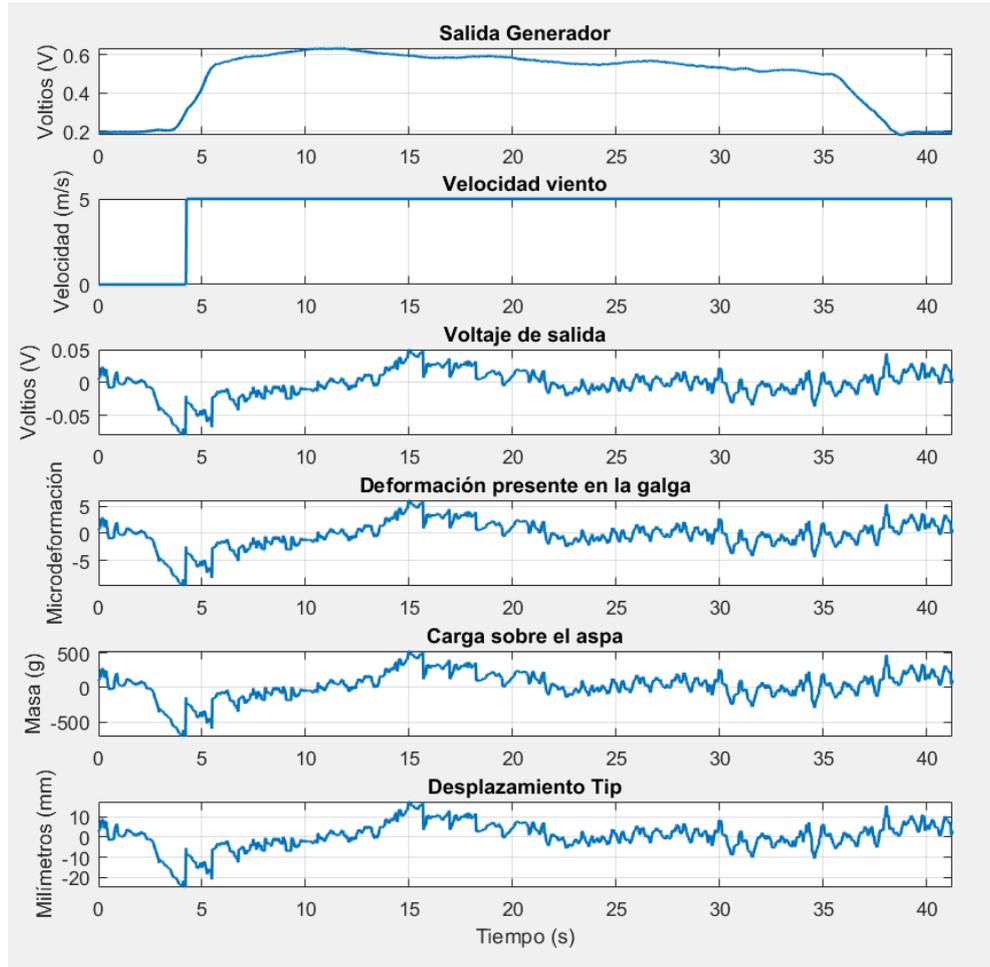


Figura 4.9: Resultados ensayo 3, interfaz inalámbrica

4.2.4. Ensayo 4

Este ensayo consiste en verificar el estado del aspa, ante variaciones de velocidad de viento. Este consiste en incrementar la velocidad hasta un valor de 5m/s y luego disminuirla gradualmente hasta llegar a 0m/s.

Resultados obtenidos mediante anillos deslizantes e interfaz inalámbrica

En la Figura 4.10, se puede observar que las oscilaciones de carga y desplazamiento sobre el aspa, son de mayor amplitud cuando la velocidad del viento es de 5m/s. Sin embargo, si la velocidad del viento disminuye gradualmente, la carga y desplazamiento sobre el aspa se reducen de igual manera. La salida del generador también se ve afectada, debido a que esta se incrementa o disminuye de acuerdo a la velocidad del viento. Finalmente, se puede observar que la respuesta de ambos sistemas (anillos deslizantes e inalámbrico) poseen el mismo comportamiento, pero la respuesta inalámbrica posee picos de mayor amplitud.

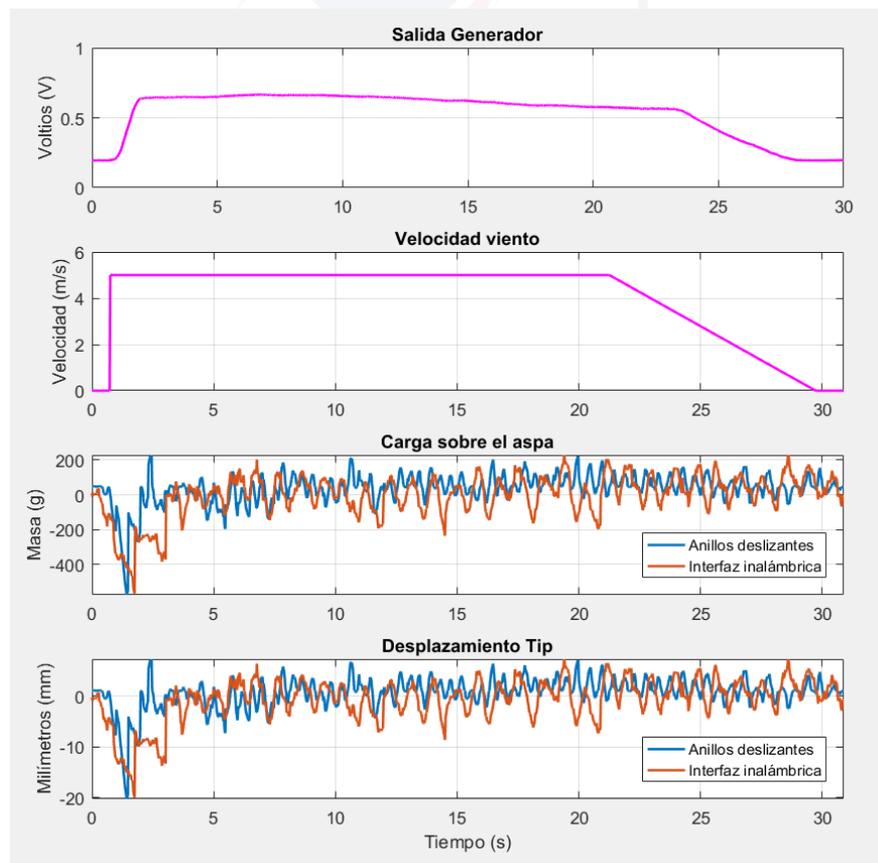


Figura 4.10: Resultados ensayo 4, anillos deslizantes e interfaz inalámbrica

4.2.5. Ensayo 5

Este ensayo consiste en verificar el estado del aspa ante una velocidad de viento de 1.5m/s, pero con un ángulo pitch de 10° grados.

Resultados obtenidos mediante anillos deslizantes e interfaz inalámbrica

Los resultados de este ensayo (Figura 4.11), son similares al ensayo 1, ya que se empleó la misma velocidad de viento. Sin embargo se modificó el ángulo pitch a 10°C. Se puede decir que existe una ligera reducción de estrés sobre el aspa.

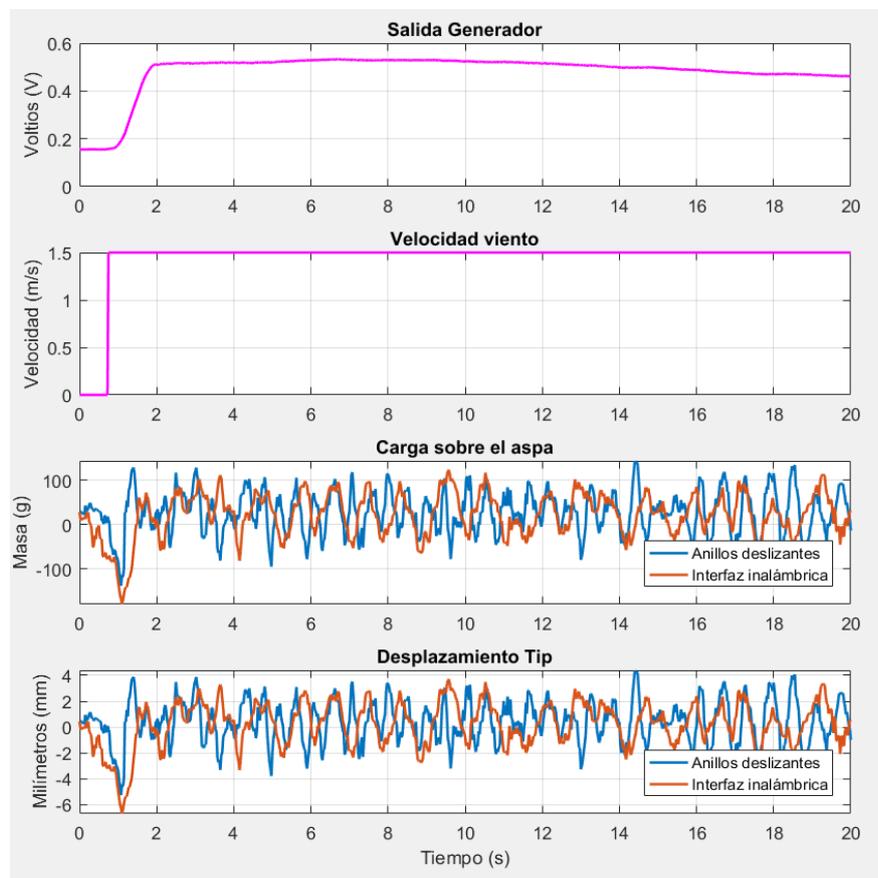


Figura 4.11: Resultados ensayo 5, anillos deslizantes e interfaz inalámbrica

4.3. Análisis estadístico de los ensayos

Analizando los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos realizados, se puede verificar que el mayor desplazamiento y carga sobre el aspa se dan en el ensayo 4.3, en el cual se alcanzan valores de 847g de carga y 28.2 milímetros de desplazamiento de la punta del aspa. Los ensayos que menor estrés generan sobre el aspa corresponden al ensayo 4.1 y 4.2, en los cuales se alcanzan valores más pequeños.

En los resultados obtenidos mediante anillos deslizantes y la interfaz inalámbrica existen ligeras variaciones. Esto se puede deber a que la interfaz inalámbrica es altamente dependiente del medio en el cual se está transmitiendo.

En la Figura 4.12a y 4.12b, se muestran análisis de los ensayos 4.1, 4.2 y 4.3, en el cual se puede observar que la mayor carga y desplazamiento sobre el aspa, se da cuando la velocidad del viento es alta. Para velocidades de viento pequeñas, la carga y desplazamiento se reducen proporcionalmente.

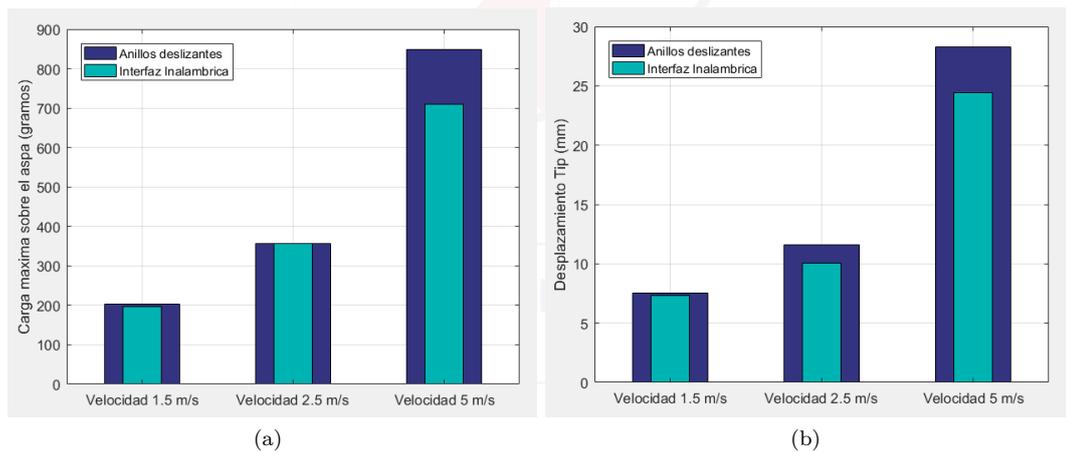


Figura 4.12: Resumen de los ensayos a distintas velocidades de viento

En la figura 4.13a, 4.13b se muestra comparaciones entre el ensayo 4.1 y 4.5. La velocidad de viento en ambos ensayos es de 1.5m/s. En el ensayo 1, el ángulo pitch es igual a 0° , mientras que en el ensayo 5, el ángulo pitch es de 10° . Se puede decir que, modificar el ángulo pitch, ayuda a disminuir el estrés sobre el aspa. Se alcanzó una reducción del 17% tanto en la carga como en el desplazamiento de la punta del aspa.

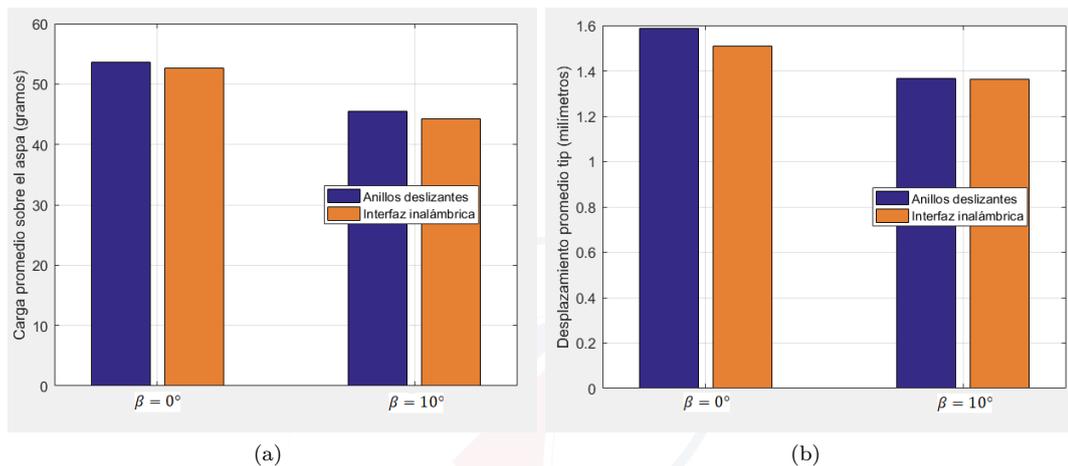


Figura 4.13: Resumen de los ensayos 1 y 5 a una velocidad de 1.5m/s con diferente ángulo pitch

Tabla 4.1: Análisis ensayo 1 (1.5m/s)

Ensayo	Sistema	Información	Valor máximo	Valor promedio	Desviación estándar
1	Anillos deslizantes	Deformación presente en la galga (micro deformación)	1.587	0.215	0.284
		Carga sobre el aspa (gramos)	202.879	53.612	44.7662
		Desplazamiento Tip (milímetros)	7.5310	1.474	1.533
	Inalámbrico	Deformación presente en la galga (micro deformación)	1.509	0.206	0.239
		Carga sobre el aspa (gramos)	196.197	52.454	47.096
		Desplazamiento Tip (milímetros)	7.3031	1.4365	1.613



Tabla 4.2: Análisis ensayo 2 (2.5m/s)

Ensayo	Sistema	Información	Valor máximo	Valor promedio	Desviación estándar
2	Anillos deslizantes	Deformación presente en la galga (micro deformación)	1.915	0.566	0.669
		Carga sobre el aspa (gramos)	356.575	68.141	68.144
		Desplazamiento Tip (milímetros)	11.6293	2.068	2.333
	Inalámbrico	Deformación presente en la galga (micro deformación)	1.914	0.589	0.689
		Carga sobre el aspa (gramos)	356.5752	103.6835	104.258
		Desplazamiento Tip (milímetros)	10.069	3.3368	3.5709

Tabla 4.3: Análisis ensayo 3 (5m/s)

Ensayo	Sistema	Información	Valor máximo	Valor promedio	Desviación estándar
3	Anillos deslizantes	Deformación presente en la galga (micro deformación)	11.369	2.116	2.913
		Carga sobre el aspa (gramos)	847.573	175.466	229.224
		Desplazamiento Tip (milímetros)	28.259	5.852	7.850
	Inalámbrico	Deformación presente en la galga (micro deformación)	9.651	1.810	2.464
		Carga sobre el aspa (gramos)	710.677	145.587	193.602
		Desplazamiento Tip (milímetros)	24.400	4.897	6.630



Tabla 4.4: Análisis ensayo 4 (gradual)

Ensayo	Sistema	Información	Valor máximo	Valor promedio	Desviación estándar
4	Anillos deslizantes	Deformación presente en la galga (micro deformación)	3.075	0.9446	1.4953
		Carga sobre el aspa (gramos)	573.6	71.340	88.130
		Desplazamiento Tip (milímetros)	20.2275	2.1697	3.0184
	Inalámbrico	Deformación presente en la galga (micro deformación)	3.032	1.3676	1.441
		Carga sobre el aspa (gramos)	565.6064	89.3865	121.852
		Desplazamiento Tip (milímetros)	19.955	3.0176	4.1734

Tabla 4.5: Análisis ensayo 5 (pitch=10°)

Ensayo	Sistema	Información	Valor máximo	Valor promedio	Desviación estándar
5	Anillos deslizantes	Deformación presente en la galga (micro deformación)	1.249	0.2025	0.339
		Carga sobre el aspa (gramos)	143.762	45.4495	48.1237
		Desplazamiento Tip (milímetros)	5.271	1.366	1.647
	Inalámbrico	Deformación presente en la galga (micro deformación)	1.564	0.197	0.348
		Carga sobre el aspa (gramos)	179.962	44.2898	49.5118
		Desplazamiento Tip (milímetros)	6.6908	1.362	1.695

4.4. Análisis de los ensayos en el dominio de la frecuencia

En la sección anterior se realizó un análisis estadístico, de cada uno de los ensayos. A continuación, se realiza un análisis en frecuencia de los ensayos 4.1, 4.2 y 4.3. En la Figura 4.15, se puede observar que una velocidad de viento alta, tiene un impacto sobre la magnitud de las componentes espectrales. Es decir, la magnitud del espectro crece cuando la velocidad del viento es alta.

En la Figura 4.14, se muestra un comparativa de los resultados obtenidos en el análisis frecuencia. En donde las máximas amplitudes alcanzadas por las componentes espectrales están en función de la velocidad del viento.

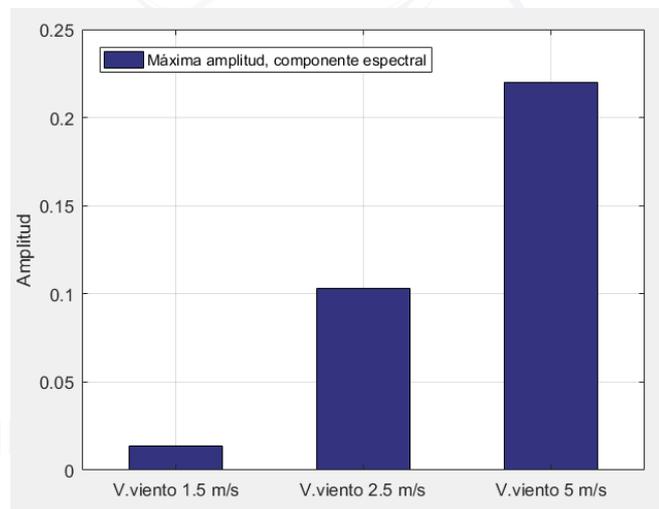


Figura 4.14: Dominio de la frecuencia

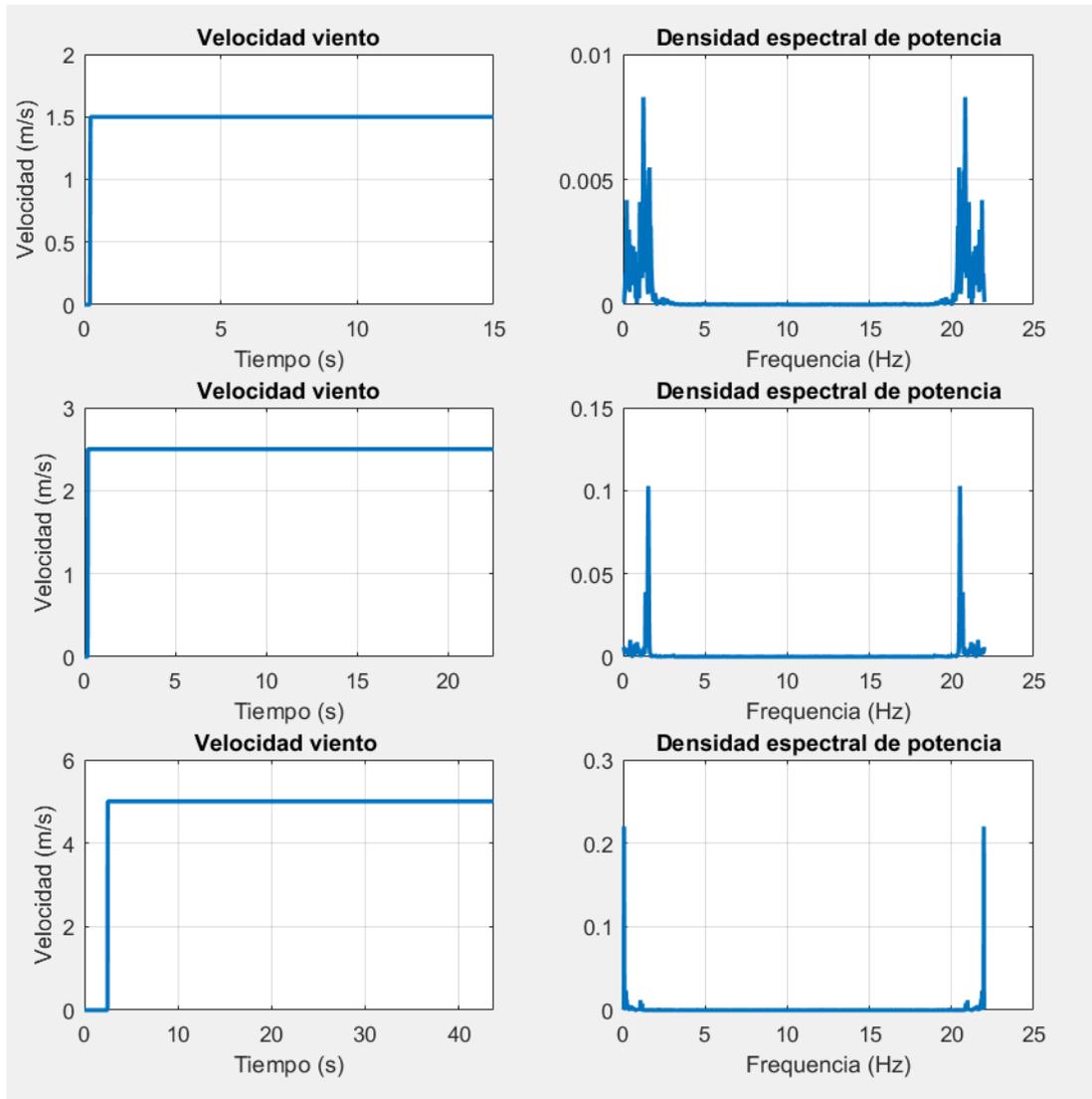


Figura 4.15: Análisis en frecuencia

4.5. Evaluación del sistema inalámbrico

El sistema inalámbrico de comunicación consta de dos módulos NodeMCU (ESP8266), los cuales usan el estándar 802.11b. El análisis que se realizó fue un conteo de la cantidad de paquetes que recibe el servidor en una ventana de tiempo, cuando el cliente se encuentra en la parte móvil del aerogenerador. Estas pruebas fueron realizadas a diferentes distancias entre el servidor y el aerogenerador.

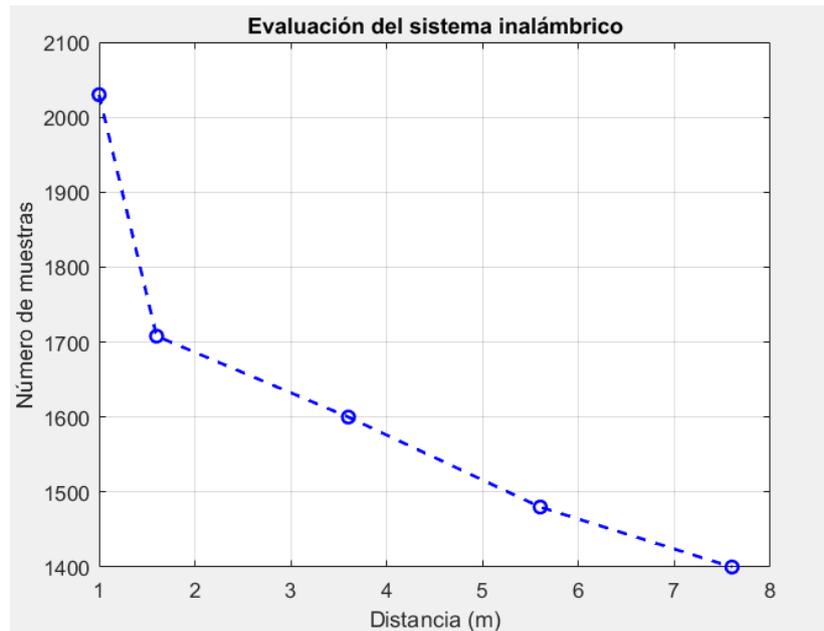


Figura 4.16: Evaluación del sistema inalámbrico

Como muestra la Figura 4.16, la cantidad de paquetes que llegan al servidor es menor conforme este se aleja del punto de acceso. Sin embargo, como se usa el estándar 802.11b (*Wifi*), si bien algunos paquetes se pierden en la transmisión, los paquetes que si llegan no contienen errores.

4.6. Sistema remoto - ThingSpeak

En las siguientes figuras, se muestra el resultado de la información enviada a la interfaz remota Thingspeak. En la interfaz remota se puede obtener información correspondiente a la carga (Figura 4.17) y desplazamiento (Figura 4.18) generado sobre el aspa. La información es actualizada cada 15 segundos. Cabe recalcar que este servidor no es gratuito y tiene un cierto límite de datos que puede alojar de manera gratuita. La configuración de un usuario para alojar datos, requiere únicamente de la creación de una cuenta. Para el alojamiento de la información se debe crear un canal, el cual dispone de ocho campos, es decir, se pueden alojar información de hasta ocho sensores a la vez.

También existe la posibilidad de tener más canales, lo cual multiplica la capacidad de información que se puede subir a este servidor.

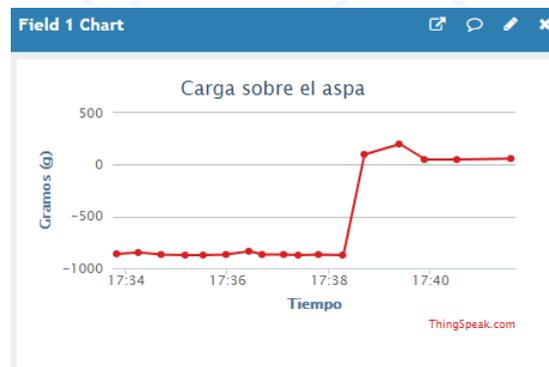


Figura 4.17: Cargas sobre el aspa

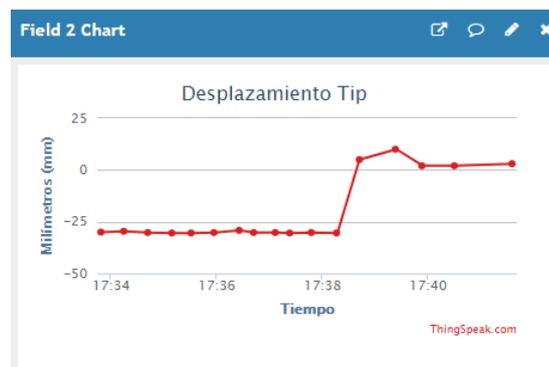


Figura 4.18: Desplazamiento *tip*



Capítulo 5

Conclusiones



En este capítulo se presentan las conclusiones finales del trabajo realizado, así como la interpretación de los resultados, las limitaciones que se encontraron en el proceso, y finalmente, se proponen maneras de ampliar el proyecto a futuro.

UNIVERSIDAD DE CUENCA
desde 1867



5.1. Conclusiones

En el desarrollo del presente proyecto técnico, se mostró la elaboración del sistema de instrumentación para la medición de esfuerzos sobre el aspa de un aerogenerador. Este proyecto consistió en la construcción de un prototipo de aerogenerador, el cual permitió observar los esfuerzos que sufre un aspa de una turbina eólica cuando se la somete a diferentes velocidades de viento.

Se diseñó e implementó un sistema de instrumentación que acondicione la señal obtenida por el puente de Wheatstone, con la configuración de puente completo, para su posterior envío. Se desarrollaron dos métodos de comunicación una guiada y otra inalámbrica, aunque los dos métodos requieren una fuente de alimentación.

El método guiado usa el modelo de anillos deslizantes para comunicar de manera serial los datos obtenidos del sistema de instrumentación. Mientras que el método inalámbrico usa la arquitectura cliente-servidor. Además, de emplear un router con el estándar 802.11b que sirve como puente entre los ambos módulos Wifi.

Realizando una comparación entre los dos métodos de comunicación se puede concluir que ambos métodos tienen sus ventajas y desventajas. La parte mecánica (anillos deslizantes) por el hecho de usar un módulo serial permite el envío de datos de varios sensores a la vez, otorgando la posibilidad de aumentar los parámetros de medición sobre el aspa. Esto con la complejidad de requerir un dispositivo físico, colocado en el eje del aerogenerador para realizar la comunicación y alimentación de los circuitos necesarios que van sobre la parte giratoria del aerogenerador. El método inalámbrico al igual que el anterior permite el envío de la información de varios sensores a la vez, pero evitando un extenso cableado y un complejo mecanismo de alimentación. Este método al ser transmitido por un medio no guiado es dependiente de las variaciones del entorno. Debido a la no presencia de un mecanismo que permita la conexión entre la parte móvil y fija del aerogenerador, se requiere la implementación de una batería, colocada en parte móvil del aerogenerador. Esta solución sería factible solo en aerogeneradores de gran potencia, ya que, debido a su gran tamaño, este no vería afectado su aerodinámica.

También se implementó una interfaz gráfica la cual permite la visualización del estado del aspa en tiempo real. Además, de la monitorización mediante interfaz remota que muestra la carga y desplazamiento presentes en el aspa. Dicha información es actualizada periódicamente y puede ser vista en cualquier parte del mundo con acceso a internet. Finalmente, como se pudo observar en los análisis estadísticos, se demostró que es posible reducir el estrés que sufre el aspa variando el ángulo paso o ángulo pitch, esto en relación a una posible variable de control que reduzca el estrés sobre el aspa, ayudando al aumento de su vida útil, principalmente enfocado al monitoreo del estado del aspa.



5.2. Recomendaciones

Para mejorar la respuesta, por parte del sistema de medición, se sugiere la construcción de un túnel de viento. El cual podría generar eventos especiales sobre el aerogenerador y brindar información extra.

Tomando en cuenta que las galgas brindan mediciones puntuales, se sugiere la implementación de más galgas sobre el aspa, con la intención de obtener información adicional.

El tamaño de las galgas juega un rol importante ya que su sensibilidad depende de ello. Por lo cual su tamaño debe ir acorde al tamaño del espécimen de prueba.

5.3. Trabajos futuros

Implementar un sistema de calibración de galgas mediante visión artificial que permita una mejor adquisición de datos, con la finalidad de encontrar modelos matemáticos que permitan describir un mejor estado del aspa.

Realizar un sistema de realimentación y de control que se aplique en conjunto con el sistema de medición implementando.

Implementar otros tipos de sensores como acelerómetros MEMS, los cuales puedan ayudar a tener una mejor información sobre el estado del aspa.

Para la transmisión de información desde la ubicación de los sensores a la cabina de control, emplear otros tipos de tecnología como Zigbee. Ya que no siempre es posible implementar un sistema mecánico que permita la alimentación de energía para los sensores.

A large, faint, stylized logo of the Universidad de Cuenca, consisting of a light blue circle with a red and white abstract shape inside.

Anexos

UNIVERSIDAD DE CUENCA
desde 1867



Apéndice A

Código fuente - Servidor ESP8266



En este apéndice se encuentra el código fuente, que fue cargado en el módulo NodeMCU - Servidor. Este código es el encargado de recibir la información inalámbricamente del cliente y enviarlo de forma serial, para la visualización de la misma.

```

1 #include <ESP8266WiFi.h>
3 //SSID y Password Router
const char* ssid = "TP-Link_CB28";
5 const char* password = "64230122";
7 //Puerto Servidor
WiFiServer server(80);
9
11 //Inicio de variables
int sep;
int lon;
13 String a;
String b;
15 float c;
float suma=0;
17 float diff;
int contador=0;
19 int aux=0;
int var1;
21 int var2;
23 void setup() {
    Serial.begin(9600);
25    delay(10);
    //Conexion a red WiFi
27    Serial.print("Connecting to ");
    Serial.println(ssid);
29    WiFi.begin(ssid, password);
    while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
31        delay(500);
        Serial.print(".");
33    }
35    Serial.println("WiFi connected");
    // Inicio del servidor
37    server.begin();
    Serial.println("Server started");
39    Serial.println(WiFi.localIP());
    aux=0;
41 }
43 void loop() {
    // Verificar cliente conectado
45    WiFiClient client = server.available();
    if (!client) {
47        return;
    }
49    //Verificar si el cliente envia datos
    while(!client.available()){
51        break;
    }
}

```

```

53 //Lectura de datos enviados por el cliente
    String req = client.readStringUntil('\r');
55 client.flush();
    sep=req.indexOf(",");
57 lon=req.length();
    a=req.substring(0,sep);
59 b=req.substring(sep+1,lon);
    Serial.print(a.toInt());
61 Serial.print(",");
    Serial.print(b.toInt());
63 Serial.print(",");
    Serial.println(c);
65 //Calculo del offset
    contador=contador+1;
67 if(contador<101){
    diff=a.toFloat()-b.toFloat();
69 suma=suma+diff;
    }else{
71 c=suma/100;
    contador=0;
73 suma=0;
    diff=0;
75 }
}

```



Apéndice B

Código fuente - Cliente ESP8266



En este apéndice se encuentra el código fuente, que fue cargado en el módulo NodeMCU - Cliente. Cumple con la función de capturar los valores analógicos provenientes del circuito de medición y enviarlos de manera inalámbrica al servidor local y remoto.

UNIVERSIDAD DE CUENCA
desde 1867

```

1 #include <ESP8266WiFi.h>
2 #include <ESP8266WiFiMulti.h>
3 ESP8266WiFiMulti WiFiMulti;
4 WiFiClient client;
5
6
7 int a;
8 int b;
9 int contador=0;
10 int var;
11 int valor1;
12 int valor2;
13
14 //Claves servidor remoto
15 String apiKey = "524DIVIYVCM2INVW";
16 const char* server = "api.thingspeak.com";
17
18 void setup() {
19     Serial.begin(9600);
20     pinMode(16,OUTPUT); //DO—A
21     pinMode(5,OUTPUT); //D1—B
22     pinMode(4,OUTPUT); //D2—C
23
24     // Conexion a red WIFI
25     WiFi.mode(WIFI_STA);
26     WiFiMulti.addAP("TP-Link_CB28", "64230122");
27     Serial.println();
28     Serial.println();
29     Serial.print("Wait for WiFi... ");
30
31     while(WiFiMulti.run() != WL_CONNECTED) {
32         Serial.print(".");
33         delay(500);
34     }
35
36     Serial.println("");
37     Serial.println("WiFi conectado");
38     Serial.println("Direccion IP:");
39     Serial.println(WiFi.localIP());
40 }
41
42 void loop() {
43     //Conexion TCP con el servidor local
44     const uint16_t port = 80;
45     const char * host = "192.168.0.101";
46     if (!client.connect(host, port)) {
47         Serial.println("Conexion fallida");
48         Serial.println("Esperar ...");
49         delay(100);
50         return;
51     }
52     // Envio de datos al servidor local
53     Serial.print("Datos: ");

```

```

53     digitalWrite(4,LOW);
    digitalWrite(5,LOW);
55     digitalWrite(16,LOW);
    valor1=analogRead(A0);
57     digitalWrite(4,LOW);
    digitalWrite(5,LOW);
59     digitalWrite(16,HIGH);
    valor2=analogRead(A0);
61     String str1=",";
    String q=valor1+str1+valor2;
63     client.println(q);
    Serial.println(q);
65     float diff=valor1-valor2;
    float sum=sum+diff;
67     contador=contador+1;
    //Conexion servidor remoto
69     if(contador>90){
        Serial.println('-----');
71         float masa=46.9676+1907.4*(valor1-valor2+sum/90)*3.3/1024;
        float desp=1.0258+65.3255*(valor1-valor2+sum/90)*3.3/1024;
73         Serial.println(masa);
        Serial.println(desp);
75         contador=0;
        diff=0;
77         sum=0;
        if (client.connect(server,80)) { //"184.106.153.149" or api.thingspeak.
            com
79             String postStr = apiKey;
            postStr += "&field1=";
81             postStr += String(masa);
            postStr += "&field2=";
83             postStr += String(desp);
            postStr += "\r\n\r\n";
85             client.print("POST /update HTTP/1.1\n");
            client.print("Host: api.thingspeak.com\n");
87             client.print("Connection: close\n");
            client.print("X-THINGSPEAKAPIKEY: "+apiKey+"\n");
89             client.print("Content-Type: application/x-www-form-urlencoded\n");
            client.print("Content-Length: ");
91             client.print(postStr.length());
            client.print("\n\n");
93             client.print(postStr);
            //Serial.println("Thingspeak");
95         }
97     }

```



Apéndice C

Código fuente - Módulo serial



En este apéndice se encuentra el código cargado en el módulo de transmisión serial. Este es el encargado de enviar los datos de manera serial por el mecanismo de anillos deslizantes, para su posterior visualización.

UNIVERSIDAD DE CUENCA
desde 1867

```

1 //Variables de envio
  int def;
3  int ref;
  int out;
5  int contador;
  float sum;
7  float defo;
  float refo;
9  float diff;
  float suma=0;
11
12 void setup() {
13   Serial.begin(9600);
  for(int i=0; i<25; i++){
15     defo=analogRead(A0);
     refo=analogRead(A1);
17     diff=defo-refo;
     suma=suma+diff;
19   }
  }
21
22 void loop() {
23   //Lectura analogica
  def=analogRead(A0);
25   ref=analogRead(A1);
  //Impresion de los datos en el puerto serial
27   Serial.print(def);
  Serial.print(",");
29   Serial.print(ref);
  Serial.print(",");
31   Serial.println(suma/25);
  delay(40);
33   //Calculo del offset
  contador=contador+1;
35   diff=def-ref;
  sum=sum+diff;
37   if(contador==25){
     suma=sum;
39     contador=0;
     diff=0;
41     sum=0;
  }
43 }

```



Apéndice D

Algoritmo de inicio



Este apéndice, consiste en un *script* de configuración de inicio, el cual cumple la función de cargar valores iniciales, para la ejecución de la interfaz gráfica. Dichos valores iniciales corresponden a los coeficientes de los modelos lineales.

UNIVERSIDAD DE CUENCA
desde 1867



```
1 Rg=60;
2 gain=1+(49.4*1000/Rg);
3
4 % Voltaje de salida (15cm)
5 vout=[0 0.015 0.03 0.045 0.06 0.075]*4;
6 A=[1 vout(1); 1 vout(2); 1 vout(3); 1 vout(4); 1 vout(5); 1 vout(6)];
7 % MASA
8 % y=a0+a1*x
9 masa=[0 200 300 400 500 600];
10 solve_masa = linsolve(A,masa');
11 a0m=solve_masa(1,1);
12 alm=solve_masa(2,1);
13 ym=a0m+alm*vout;
14
15 subplot(2,1,1),plot(vout,masa*9.81/1000,'r*',vout,ym*9.81/1000,'g—o'),grid on, title('Fuerza sobre el aspa'),ylabel('Fuerza (N)'),
16 xlabel('Voltaje (V)');
17 % DESPLAZAMIENTO
18 % y=a0+a1*x
19 desp=[0 6 9 13 17 20];
20 solve_desp = linsolve(A,desp');
21 a0d=solve_desp(1,1);
22 ald=solve_desp(2,1);
23 yd=a0d+ald*vout;
24 subplot(2,1,2),plot(vout,desp,'r*',vout,yd,'g—o'),grid on, title('Desplazamiento Tip'),ylabel('Milímetros (mm)'), xlabel('Voltaje (V)');
```



Apéndice E

Amplificador de instrumentación



En este apéndice se encuentra el *datasheet* del amplificador de instrumentación, utilizado en este proyecto técnico.

UNIVERSIDAD DE CUENCA
desde 1867

FEATURES

Easy to use

Available in space-saving MSOP

Gain set with 1 external resistor (gain range 1 to 1000)

Wide power supply range: ± 2.3 V to ± 18 V

Temperature range for specified performance:

-40°C to $+85^{\circ}\text{C}$

Operational up to 125°C ¹

Excellent AC specifications

80 dB minimum CMRR to 10 kHz ($G = 1$)

825 kHz, -3 dB bandwidth ($G = 1$)

2 V/ μs slew rate

Low noise

8 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$, @ 1 kHz, maximum input voltage noise

0.25 μV p-p input noise (0.1 Hz to 10 Hz)

High accuracy dc performance (AD8221BR)

90 dB minimum CMRR ($G = 1$)

25 μV maximum input offset voltage

0.3 $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ maximum input offset drift

0.4 nA maximum input bias current

APPLICATIONS

Weigh scales

Industrial process controls

Bridge amplifiers

Precision data acquisition systems

Medical instrumentation

Strain gages

Transducer interfaces

GENERAL DESCRIPTION

The AD8221 is a gain programmable, high performance instrumentation amplifier that delivers the industry's highest CMRR over frequency in its class. The CMRR of instrumentation amplifiers on the market today falls off at 200 Hz. In contrast, the AD8221 maintains a minimum CMRR of 80 dB to 10 kHz for all grades at $G = 1$. High CMRR over frequency allows the AD8221 to reject wideband interference and line harmonics, greatly simplifying filter requirements. Possible applications include precision data acquisition, biomedical analysis, and aerospace instrumentation.

CONNECTION DIAGRAM

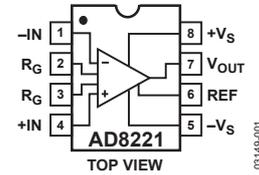


Figure 1.

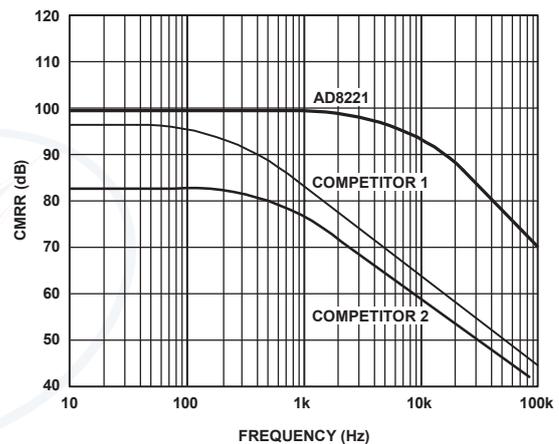


Figure 2. Typical CMRR vs. Frequency for $G = 1$

Low voltage offset, low offset drift, low gain drift, high gain accuracy, and high CMRR make this part an excellent choice in applications that demand the best dc performance possible, such as bridge signal conditioning.

Programmable gain affords the user design flexibility. A single resistor sets the gain from 1 to 1000. The AD8221 operates on both single and dual supplies and is well suited for applications where ± 10 V input voltages are encountered.

The AD8221 is available in a low cost 8-lead SOIC and 8-lead MSOP, both of which offer the industry's best performance. The MSOP requires half the board space of the SOIC, making it ideal for multichannel or space-constrained applications.

Performance is specified over the entire industrial temperature range of -40°C to $+85^{\circ}\text{C}$ for all grades. Furthermore, the AD8221 is operational from -40°C to $+125^{\circ}\text{C}$ ¹.

¹ See Typical Performance Characteristics for expected operation from 85°C to 125°C .

Rev. C

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties that may result from its use. Specifications subject to change without notice. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

AD8221* PRODUCT PAGE QUICK LINKS

Last Content Update: 02/23/2017

COMPARABLE PARTS

View a parametric search of comparable parts.

EVALUATION KITS

- AD62x, AD822x, AD842x Series InAmp Evaluation Board

DOCUMENTATION

Application Notes

- AN-1401: Instrumentation Amplifier Common-Mode Range: The Diamond Plot
- AN-282: Fundamentals of Sampled Data Systems
- AN-671: Reducing RFI Rectification Errors in In-Amp Circuits
- AN-683: Strain Gage Measurement Using an AC Excitation

Data Sheet

- AD8221-DSCC: Military Data Sheet
- AD8221-EP: Enhanced Product Data Sheet
- AD8221: Precision Instrumentation Amplifier Data Sheet

Technical Books

- A Designer's Guide to Instrumentation Amplifiers, 3rd Edition, 2006

User Guides

- UG-261: Evaluation Boards for the AD62x, AD822x and AD842x Series

TOOLS AND SIMULATIONS

- AD8221 SPICE Macro-Model

REFERENCE DESIGNS

- CN0114

REFERENCE MATERIALS

Technical Articles

- Eye Movement Controls Gaming Console
- High-performance Adder Uses Instrumentation Amplifiers
- Input Filter Prevents Instrumentation-amp RF-Rectification Errors
- MS-2160: Mitigation Strategies for ECG Design Challenges
- MS-2178: Discussion Between CareFusion and Analog Devices: Optimizing Performance and Lowering Power in an EEG Amplifier
- The AD8221 - Setting a New Industry Standard for Instrumentation Amplifiers

DESIGN RESOURCES

- AD8221 Material Declaration
- PCN-PDN Information
- Quality And Reliability
- Symbols and Footprints

DISCUSSIONS

View all AD8221 EngineerZone Discussions.

SAMPLE AND BUY

Visit the product page to see pricing options.

TECHNICAL SUPPORT

Submit a technical question or find your regional support number.

DOCUMENT FEEDBACK

Submit feedback for this data sheet.

TABLE OF CONTENTS

Features	1	Layout	18
Applications.....	1	Reference Terminal	19
General Description	1	Power Supply Regulation and Bypassing	19
Connection Diagram	1	Input Bias Current Return Path	19
Revision History	2	Input Protection	19
Specifications.....	3	RF Interference	20
Absolute Maximum Ratings.....	8	Precision Strain Gage.....	20
Thermal Characteristics	8	Conditioning ± 10 V Signals for a +5 V Differential Input ADC	20
ESD Caution.....	8	AC-Coupled Instrumentation Amplifier	21
Pin Configuration and Function Descriptions.....	9	Die Information.....	22
Typical Performance Characteristics	10	Outline Dimensions	23
Theory of Operation	17	Ordering Guide	24
Gain Selection	18		

REVISION HISTORY

3/11—Rev. B to Rev. C

Added Pin Configuration and Function Descriptions Section..	9
Added Die Information Section	22
Updated Outline Dimensions	23
Changes to Ordering Guide	24

9/07—Rev. A to Rev. B

Changes to Features.....	1
Changes to Table 1 Layout.....	3
Changes to Table 2 Layout.....	5
Changes to Figure 15.....	11
Changes to Figures 32	13
Changes to Figure 33, Figure 34, and Figure 35	14
Updated Outline Dimensions	21
Changes to Ordering Guide	22

11/03—Rev. 0 to Rev. A

Changes to Features.....	1
Changes to Specifications Section.....	4
Changes to Theory of Operation Section.....	13
Changes to Gain Selection Section.....	14

10/03—Revision 0: Initial Version

SPECIFICATIONS

$V_S = \pm 15\text{ V}$, $V_{REF} = 0\text{ V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$, $G = 1$, $R_L = 2\text{ k}\Omega$, unless otherwise noted.

Table 1.

Parameter	Conditions	AR Grade			BR Grade			Unit	
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max		
COMMON-MODE REJECTION RATIO									
CMRR DC to 60 Hz with 1 k Ω Source Imbalance	$V_{CM} = -10\text{ V to }+10\text{ V}$								
G = 1		80			90			dB	
G = 10		100			110			dB	
G = 100		120			130			dB	
G = 1000		130			140			dB	
CMRR at 10 kHz	$V_{CM} = -10\text{ V to }+10\text{ V}$								
G = 1		80			80			dB	
G = 10		90			100			dB	
G = 100		100			110			dB	
G = 1000		100			110			dB	
NOISE									
	RTI noise = $\sqrt{e_{NI}^2 + (e_{NO}/G)^2}$								
Voltage Noise, 1 kHz									
Input Voltage Noise, e_{NI}	$V_{IN+}, V_{IN-}, V_{REF} = 0$			8			8	nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$	
Output Voltage Noise, e_{NO}				75			75	nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$	
RTI	$f = 0.1\text{ Hz to }10\text{ Hz}$								
G = 1				2			2	$\mu\text{V p-p}$	
G = 10				0.5			0.5	$\mu\text{V p-p}$	
G = 100 to 1000				0.25			0.25	$\mu\text{V p-p}$	
Current Noise	$f = 1\text{ kHz}$			40			40	fA/ $\sqrt{\text{Hz}}$	
	$f = 0.1\text{ Hz to }10\text{ Hz}$			6			6	pA p-p	
VOLTAGE OFFSET¹									
Input Offset, V_{OSI}	$V_S = \pm 5\text{ V to } \pm 15\text{ V}$			60			25	μV	
Over Temperature	$T = -40^\circ\text{C to }+85^\circ\text{C}$			86			45	μV	
Average TC				0.4			0.3	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	
Output Offset, V_{OSO}	$V_S = \pm 5\text{ V to } \pm 15\text{ V}$			300			200	μV	
Over Temperature	$T = -40^\circ\text{C to }+85^\circ\text{C}$			0.66			0.45	mV	
Average TC				6			5	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	
Offset RTI vs. Supply (PSR)	$V_S = \pm 2.3\text{ V to } \pm 18\text{ V}$								
G = 1		90	110		94	110		dB	
G = 10		110	120		114	130		dB	
G = 100		124	130		130	140		dB	
G = 1000		130	140		140	150		dB	
INPUT CURRENT									
Input Bias Current				0.5	1.5		0.2	0.4	nA
Over Temperature	$T = -40^\circ\text{C to }+85^\circ\text{C}$				2.0			1	nA
Average TC				1			1		pA/ $^\circ\text{C}$
Input Offset Current				0.2	0.6		0.1	0.4	nA
Over Temperature	$T = -40^\circ\text{C to }+85^\circ\text{C}$				0.8			0.6	nA
Average TC				1			1		pA/ $^\circ\text{C}$
REFERENCE INPUT									
R_{IN}				20			20		k Ω
I_{IN}	$V_{IN+}, V_{IN-}, V_{REF} = 0$			50	60		50	60	μA
Voltage Range		$-V_S$			$+V_S$		$-V_S$	$+V_S$	V
Gain to Output				1 ± 0.0001			1 ± 0.0001		V/V

AD8221

Parameter	Conditions	AR Grade			BR Grade			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
POWER SUPPLY								
Operating Range	$V_S = \pm 2.3 \text{ V to } \pm 18 \text{ V}$	± 2.3		± 18	± 2.3		± 18	V
Quiescent Current			0.9	1		0.9	1	mA
Over Temperature	$T = -40^\circ\text{C to } +85^\circ\text{C}$		1	1.2		1	1.2	mA
DYNAMIC RESPONSE								
Small Signal -3 dB Bandwidth								
G = 1			825			825		kHz
G = 10			562			562		kHz
G = 100			100			100		kHz
G = 1000			14.7			14.7		kHz
Settling Time 0.01%	10 V step							
G = 1 to 100			10			10		μs
G = 1000			80			80		μs
Settling Time 0.001%	10 V step							
G = 1 to 100			13			13		μs
G = 1000			110			110		μs
Slew Rate	G = 1	1.5	2		1.5	2		V/ μs
	G = 5 to 100	2	2.5		2	2.5		V/ μs
GAIN								
Gain Range	$G = 1 + (49.4 \text{ k}\Omega/R_G)$	1		1000	1		1000	V/V
Gain Error	$V_{\text{OUT}} \pm 10 \text{ V}$							
G = 1				0.03			0.02	%
G = 10				0.3			0.15	%
G = 100				0.3			0.15	%
G = 1000				0.3			0.15	%
Gain Nonlinearity	$V_{\text{OUT}} = -10 \text{ V to } +10 \text{ V}$							
G = 1 to 10	$R_L = 10 \text{ k}\Omega$		3	10		3	10	ppm
G = 100	$R_L = 10 \text{ k}\Omega$		5	15		5	15	ppm
G = 1000	$R_L = 10 \text{ k}\Omega$		10	40		10	40	ppm
G = 1 to 100	$R_L = 2 \text{ k}\Omega$		10	95		10	95	ppm
Gain vs. Temperature								
G = 1			3	10		2	5	ppm/ $^\circ\text{C}$
G > 1 ²				-50			-50	ppm/ $^\circ\text{C}$
INPUT								
Input Impedance								
Differential			100 2			100 2		G Ω pF
Common Mode			100 2			100 2		G Ω pF
Input Operating Voltage Range ³	$V_S = \pm 2.3 \text{ V to } \pm 5 \text{ V}$	$-V_S + 1.9$		$+V_S - 1.1$	$-V_S + 1.9$		$+V_S - 1.1$	V
Over Temperature	$T = -40^\circ\text{C to } +85^\circ\text{C}$	$-V_S + 2.0$		$+V_S - 1.2$	$-V_S + 2.0$		$+V_S - 1.2$	V
Input Operating Voltage Range	$V_S = \pm 5 \text{ V to } \pm 18 \text{ V}$	$-V_S + 1.9$		$+V_S - 1.2$	$-V_S + 1.9$		$+V_S - 1.2$	V
Over Temperature	$T = -40^\circ\text{C to } +85^\circ\text{C}$	$-V_S + 2.0$		$+V_S - 1.2$	$-V_S + 2.0$		$+V_S - 1.2$	V
OUTPUT								
Output Swing	$R_L = 10 \text{ k}\Omega$							
Over Temperature	$V_S = \pm 2.3 \text{ V to } \pm 5 \text{ V}$	$-V_S + 1.1$		$+V_S - 1.2$	$-V_S + 1.1$		$+V_S - 1.2$	V
Over Temperature	$T = -40^\circ\text{C to } +85^\circ\text{C}$	$-V_S + 1.4$		$+V_S - 1.3$	$-V_S + 1.4$		$+V_S - 1.3$	V
Output Swing	$V_S = \pm 5 \text{ V to } \pm 18 \text{ V}$	$-V_S + 1.2$		$+V_S - 1.4$	$-V_S + 1.2$		$+V_S - 1.4$	V
Over Temperature	$T = -40^\circ\text{C to } +85^\circ\text{C}$	$-V_S + 1.6$		$+V_S - 1.5$	$-V_S + 1.6$		$+V_S - 1.5$	V
Short-Circuit Current			18			18		mA

Parameter	Conditions	AR Grade			BR Grade			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
TEMPERATURE RANGE								
Specified Performance		-40		+85	-40		+85	°C
Operating Range ⁴		-40		+125	-40		+125	°C

¹ Total RTI $V_{OS} = (V_{OSI}) + (V_{OSO}/G)$.

² Does not include the effects of external resistor R_G .

³ One input grounded. $G = 1$.

⁴ See Typical Performance Characteristics for expected operation between 85°C to 125°C.

Table 2.

Parameter	Conditions	ARM Grade			Unit
		Min	Typ	Max	
COMMON-MODE REJECTION RATIO (CMRR)					
CMRR DC to 60 Hz with 1 k Ω Source Imbalance	$V_{CM} = -10\text{ V to }+10\text{ V}$				
G = 1		80			dB
G = 10		100			dB
G = 100		120			dB
G = 1000		130			dB
CMRR at 10 kHz	$V_{CM} = -10\text{ V to }+10\text{ V}$				
G = 1		80			dB
G = 10		90			dB
G = 100		100			dB
G = 1000		100			dB
NOISE	$RTI\ noise = \sqrt{e_{NI}^2 + (e_{NO}/G)^2}$				
Voltage Noise, 1 kHz					
Input Voltage Noise, e_{NI}	$V_{IN+}, V_{IN-}, V_{REF} = 0$			8	nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Output Voltage Noise, e_{NO}				75	nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$
RTI	$f = 0.1\text{ Hz to }10\text{ Hz}$				
G = 1			2		$\mu\text{V p-p}$
G = 10			0.5		$\mu\text{V p-p}$
G = 100 to 1000			0.25		$\mu\text{V p-p}$
Current Noise	$f = 1\text{ kHz}$		40		fA/ $\sqrt{\text{Hz}}$
	$f = 0.1\text{ Hz to }10\text{ Hz}$		6		pA p-p
VOLTAGE OFFSET ¹					
Input Offset, V_{OSI}	$V_S = \pm 5\text{ V to } \pm 15\text{ V}$			70	μV
Over Temperature	$T = -40^\circ\text{C to }+85^\circ\text{C}$			135	μV
Average TC				0.9	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Output Offset, V_{OSO}	$V_S = \pm 5\text{ V to } \pm 15\text{ V}$			600	μV
Over Temperature	$T = -40^\circ\text{C to }+85^\circ\text{C}$			1.00	mV
Average TC				9	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Offset RTI vs. Supply (PSR)	$V_S = \pm 2.3\text{ V to } \pm 18\text{ V}$				
G = 1		90	100		dB
G = 10		100	120		dB
G = 100		120	140		dB
G = 1000		120	140		dB
INPUT CURRENT					
Input Bias Current			0.5	2	nA
Over Temperature	$T = -40^\circ\text{C to }+85^\circ\text{C}$			3	nA
Average TC			3		pA/ $^\circ\text{C}$
Input Offset Current			0.3	1	nA
Over Temperature	$T = -40^\circ\text{C to }+85^\circ\text{C}$			1.5	nA
Average TC			3		pA/ $^\circ\text{C}$

AD8221

Parameter	Conditions	ARM Grade			Unit
		Min	Typ	Max	
REFERENCE INPUT					
R_{IN}	$V_{IN+}, V_{IN-}, V_{REF} = 0$		20		k Ω
I_{IN}			50	60	μ A
Voltage Range		$-V_S$		$+V_S$	V
Gain to Output			1 ± 0.0001		V/V
POWER SUPPLY					
Operating Range	$V_S = \pm 2.3 \text{ V to } \pm 18 \text{ V}$	± 2.3		± 18	V
Quiescent Current	$T = -40^\circ\text{C to } +85^\circ\text{C}$		0.9	1	mA
Over Temperature			1	1.2	mA
DYNAMIC RESPONSE					
Small Signal -3 dB Bandwidth					
G = 1	10 V step		825		kHz
G = 10			562		kHz
G = 100			100		kHz
G = 1000			14.7		kHz
Settling Time 0.01%					
G = 1 to 100	10 V step		10		μ s
G = 1000			80		μ s
Settling Time 0.001%					
G = 1 to 100	10 V step		13		μ s
G = 1000			110		μ s
Slew Rate					
G = 1	G = 5 to 100	1.5	2		V/ μ s
G = 5 to 100		2	2.5		V/ μ s
GAIN					
Gain Range	$G = 1 + (49.4 \text{ k}\Omega/R_G)$	1		1000	V/V
Gain Error					
G = 1	$V_{OUT} \pm 10 \text{ V}$			0.1	%
G = 10				0.3	%
G = 100				0.3	%
G = 1000				0.3	%
Gain Nonlinearity					
G = 1 to 10	$V_{OUT} = -10 \text{ V to } +10 \text{ V}$ $R_L = 10 \text{ k}\Omega$		5	15	ppm
G = 100		$R_L = 10 \text{ k}\Omega$	7	20	ppm
G = 1000		$R_L = 10 \text{ k}\Omega$	10	50	ppm
G = 1 to 100		$R_L = 2 \text{ k}\Omega$	15	100	ppm
Gain vs. Temperature					
G = 1			3	10	ppm/ $^\circ\text{C}$
$G > 1^2$				-50	ppm/ $^\circ\text{C}$
INPUT					
Input Impedance					
Differential			100 2		G Ω /pF
Common Mode			100 2		G Ω /pF
Input Operating Voltage Range ³					
Over Temperature	$V_S = \pm 2.3 \text{ V to } \pm 5 \text{ V}$ $T = -40^\circ\text{C to } +85^\circ\text{C}$	$-V_S + 1.9$		$+V_S - 1.1$	V
Over Temperature	$T = -40^\circ\text{C to } +85^\circ\text{C}$	$-V_S + 2.0$		$+V_S - 1.2$	V
Over Temperature	$V_S = \pm 5 \text{ V to } \pm 18 \text{ V}$ $T = -40^\circ\text{C to } +85^\circ\text{C}$	$-V_S + 1.9$		$+V_S - 1.2$	V
Over Temperature	$T = -40^\circ\text{C to } +85^\circ\text{C}$	$-V_S + 2.0$		$+V_S - 1.2$	V
OUTPUT					
Output Swing					
Over Temperature	$R_L = 10 \text{ k}\Omega$ $V_S = \pm 2.3 \text{ V to } \pm 5 \text{ V}$ $T = -40^\circ\text{C to } +85^\circ\text{C}$	$-V_S + 1.1$		$+V_S - 1.2$	V
Over Temperature	$T = -40^\circ\text{C to } +85^\circ\text{C}$	$-V_S + 1.4$		$+V_S - 1.3$	V
Over Temperature	$V_S = \pm 5 \text{ V to } \pm 18 \text{ V}$ $T = -40^\circ\text{C to } +85^\circ\text{C}$	$-V_S + 1.2$		$+V_S - 1.4$	V
Over Temperature	$T = -40^\circ\text{C to } +85^\circ\text{C}$	$-V_S + 1.6$		$+V_S - 1.5$	V
Short-Circuit Current			18		mA

Parameter	Conditions	Min	ARM Grade		Unit
			Typ	Max	
TEMPERATURE RANGE					
Specified Performance		-40		+85	°C
Operating Range ⁴		-40		+125	°C

¹ Total RTI $V_{OS} = (V_{OS1}) + (V_{OS0}/G)$.

² Does not include the effects of external resistor R_G .

³ One input grounded. $G = 1$.

⁴ See Typical Performance Characteristics for expected operation between 85°C to 125°C.



UNIVERSIDAD DE CUENCA
desde 1867

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Table 3.

Parameter	Rating
Supply Voltage	$\pm 18\text{ V}$
Internal Power Dissipation	200 mW
Output Short-Circuit Current	Indefinite
Input Voltage (Common-Mode)	$\pm V_S$
Differential Input Voltage	$\pm V_S$
Storage Temperature Range	-65°C to $+150^\circ\text{C}$
Operating Temperature Range ¹	-40°C to $+125^\circ\text{C}$

¹ Temperature range for specified performance is -40°C to $+85^\circ\text{C}$. See Typical Performance Characteristics for expected operation from 85°C to 125°C .

Stresses above those listed under Absolute Maximum Ratings may cause permanent damage to the device. This is a stress rating only; functional operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operational section of this specification is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

THERMAL CHARACTERISTICS

Specification for a device in free air.

Table 4.

Package	θ_{JA}	Unit
8-Lead SOIC, 4-Layer JEDEC Board	121	$^\circ\text{C}/\text{W}$
8-Lead MSOP, 4-Layer JEDEC Board	135	$^\circ\text{C}/\text{W}$

ESD CAUTION



ESD (electrostatic discharge) sensitive device. Charged devices and circuit boards can discharge without detection. Although this product features patented or proprietary protection circuitry, damage may occur on devices subjected to high energy ESD. Therefore, proper ESD precautions should be taken to avoid performance degradation or loss of functionality.

PIN CONFIGURATION AND FUNCTION DESCRIPTIONS

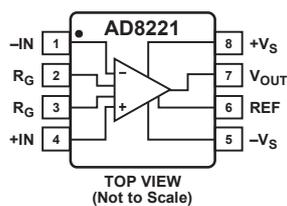


Figure 3. Pin Configuration

Table 5. Pin Function Descriptions

Pin No.	Mnemonic	Description
1	-IN	Negative Input Terminal.
2	R_G	Gain Setting Terminal. Place resistor across the R_G pins to set the gain. $G = 1 + (49.4 \text{ k}\Omega/R_G)$.
3	R_G	Gain Setting Terminal. Place resistor across the R_G pins to set the gain. $G = 1 + (49.4 \text{ k}\Omega/R_G)$.
4	+IN	Positive Input Terminal.
5	$-V_S$	Negative Power Supply Terminal.
6	REF	Reference Voltage Terminal. Drive this terminal with a low impedance voltage source to level-shift the output.
7	V_{OUT}	Output Terminal.
8	$+V_S$	Positive Power Supply Terminal.

TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS

T = 25°C, $V_S = \pm 15\text{ V}$, $R_L = 10\text{ k}\Omega$, unless otherwise noted.

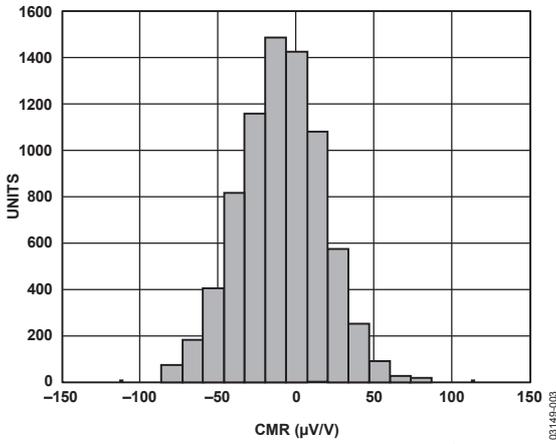


Figure 4. Typical Distribution for CMR (G = 1)

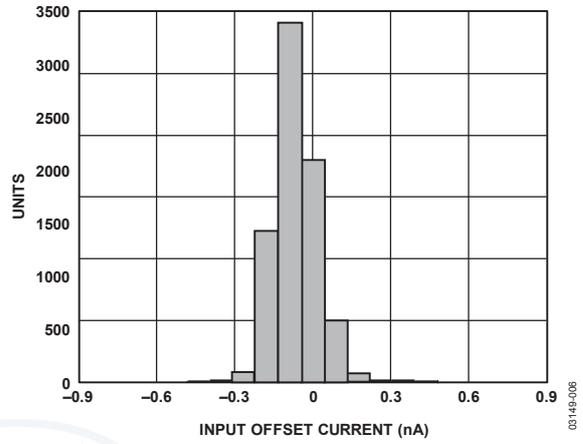


Figure 7. Typical Distribution of Input Offset Current

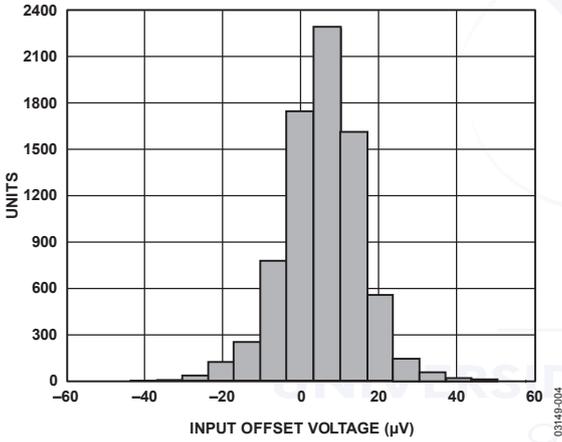


Figure 5. Typical Distribution of Input Offset Voltage

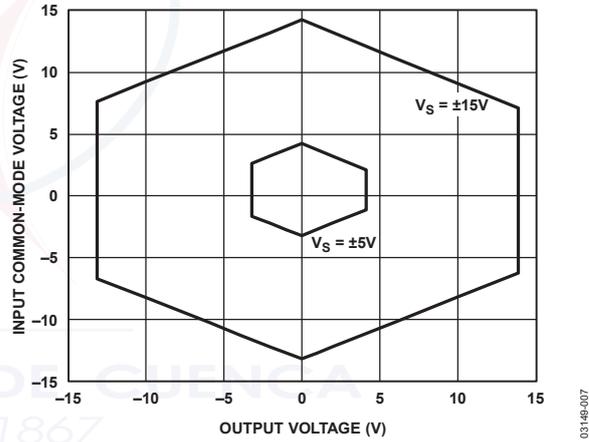


Figure 8. Input Common-Mode Range vs. Output Voltage, G = 1

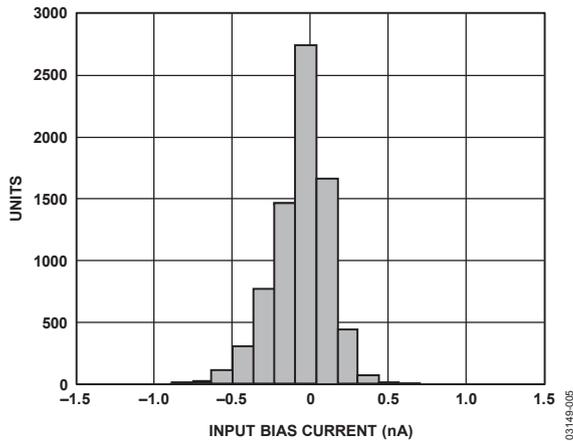


Figure 6. Typical Distribution of Input Bias Current

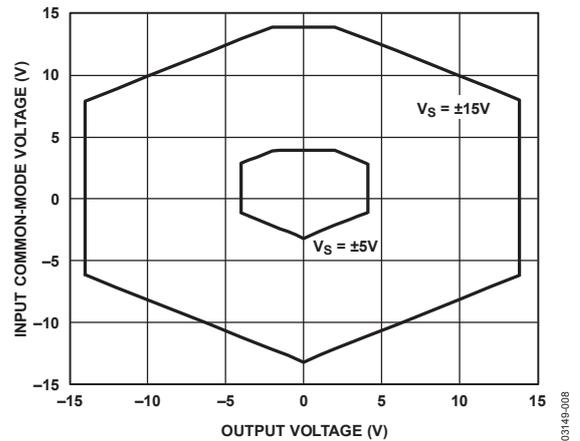


Figure 9. Input Common-Mode Range vs. Output Voltage, G = 100

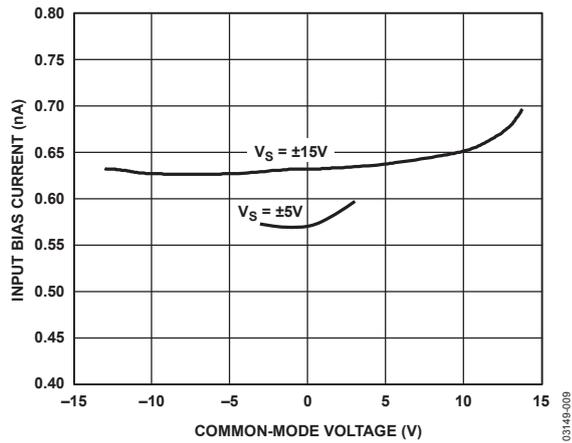


Figure 10. I_{BIAS} vs. CMV

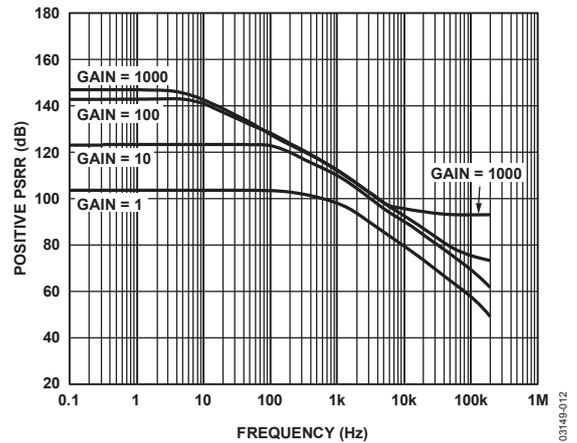


Figure 13. Positive PSRR vs. Frequency, RTI ($G = 1$ to 1000)

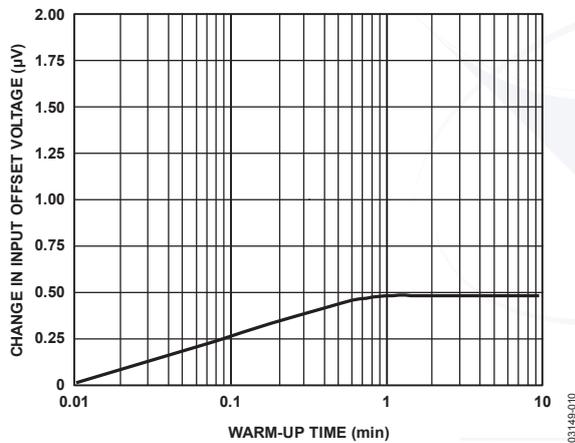


Figure 11. Change in Input Offset Voltage vs. Warm-Up Time

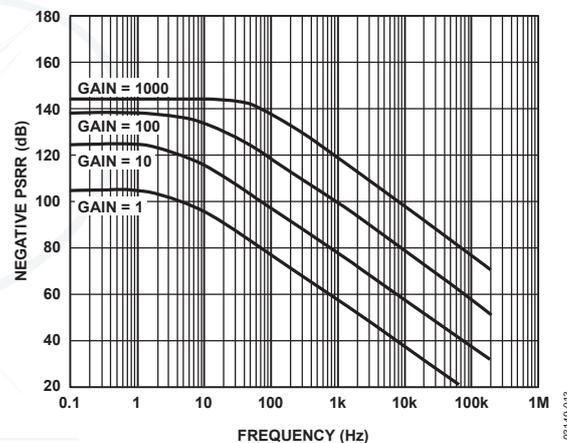


Figure 14. Negative PSRR vs. Frequency, RTI ($G = 1$ to 1000)

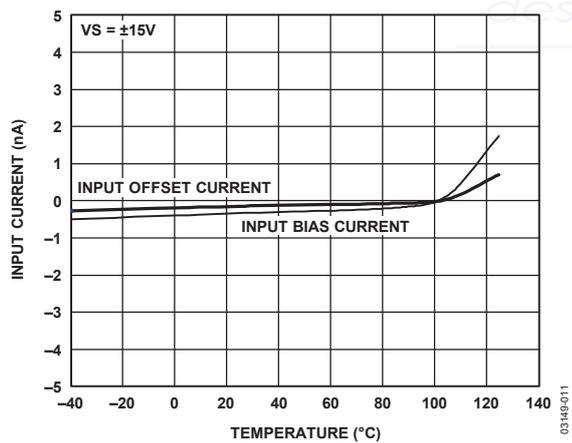


Figure 12. Input Bias Current and Offset Current vs. Temperature

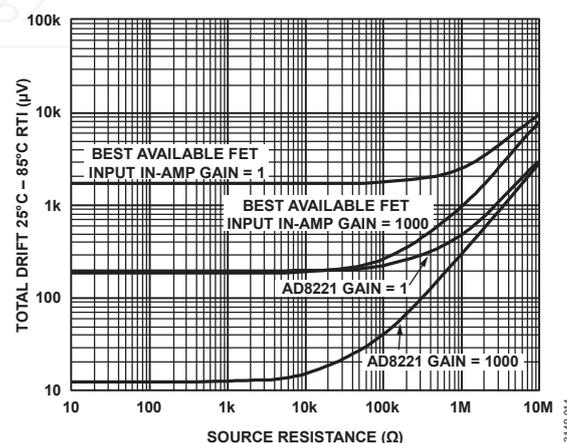


Figure 15. Total Drift vs. Source Resistance

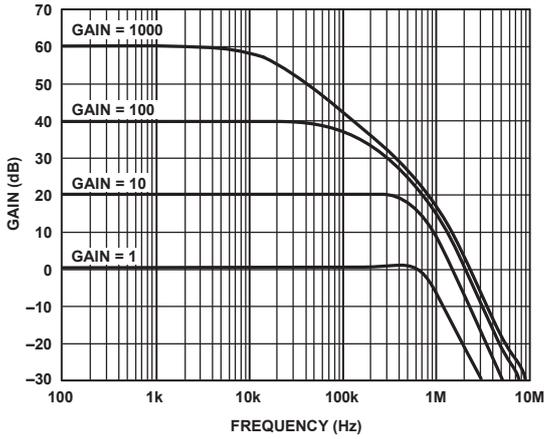


Figure 16. Gain vs. Frequency

03149-015

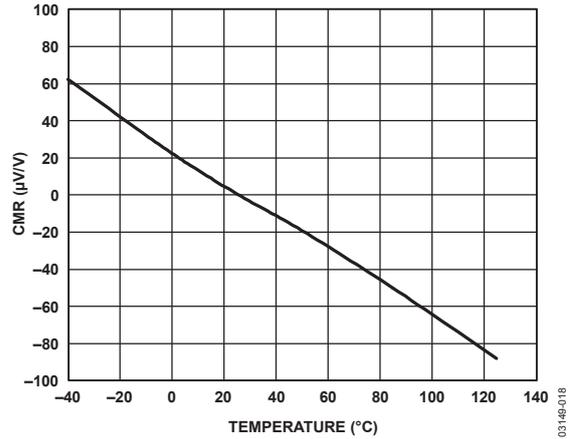


Figure 19. CMR vs. Temperature

03149-018

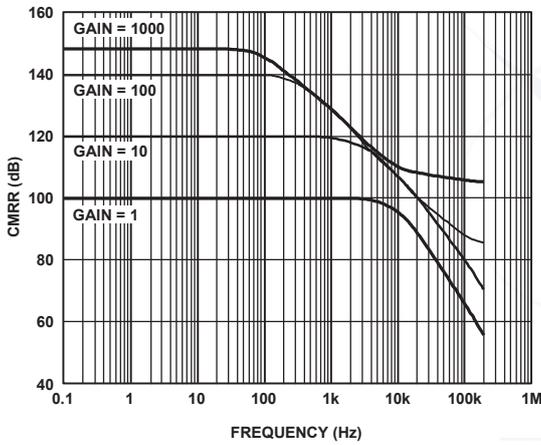


Figure 17. CMRR vs. Frequency, RTI

03149-016

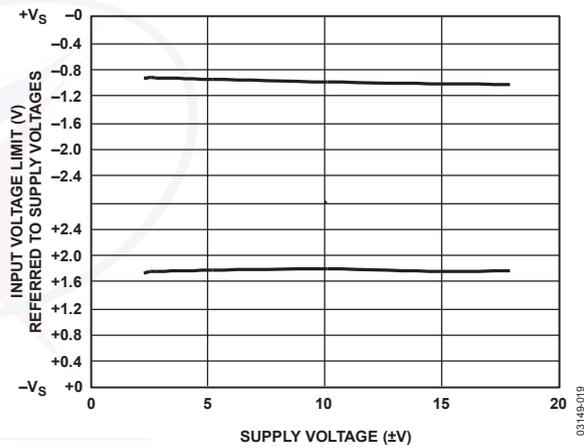


Figure 20. Input Voltage Limit vs. Supply Voltage, $G = 1$

03149-019

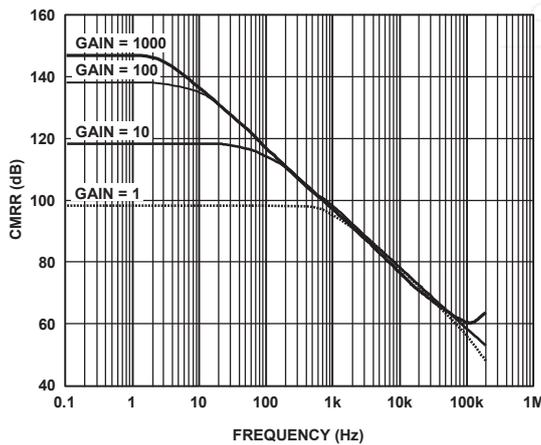


Figure 18. CMRR vs. Frequency, RTI, 1 k Ω Source Imbalance

03149-017

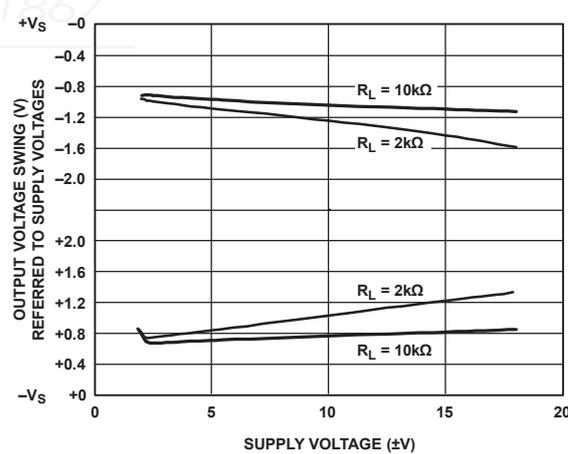


Figure 21. Output Voltage Swing vs. Supply Voltage, $G = 1$

03149-020

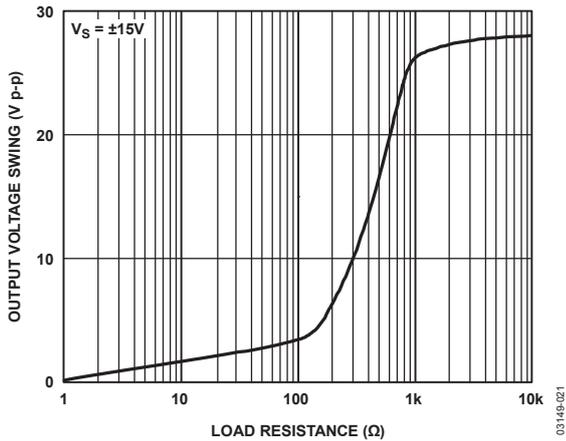


Figure 22. Output Voltage Swing vs. Load Resistance

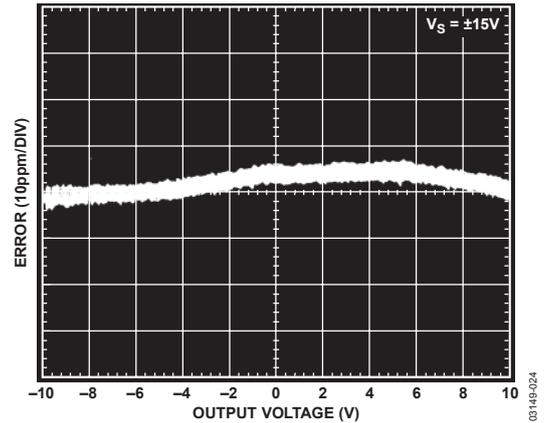


Figure 25. Gain Nonlinearity, $G = 100$, $R_L = 10\text{ k}\Omega$

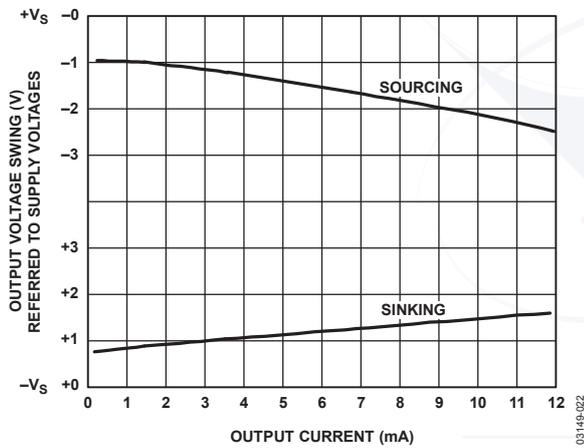


Figure 23. Output Voltage Swing vs. Output Current, $G = 1$

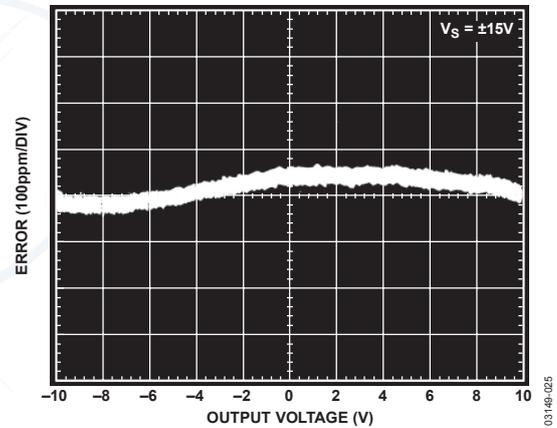


Figure 26. Gain Nonlinearity, $G = 1000$, $R_L = 10\text{ k}\Omega$

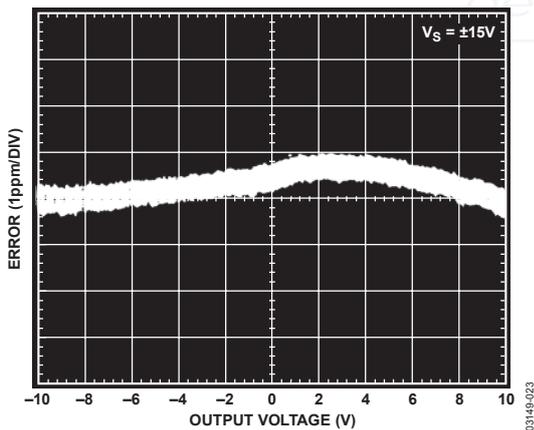


Figure 24. Gain Nonlinearity, $G = 1$, $R_L = 10\text{ k}\Omega$

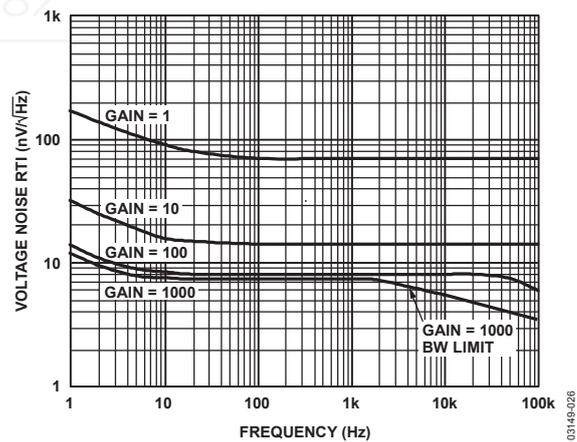


Figure 27. Voltage Noise Spectral Density vs. Frequency ($G = 1$ to 1000)

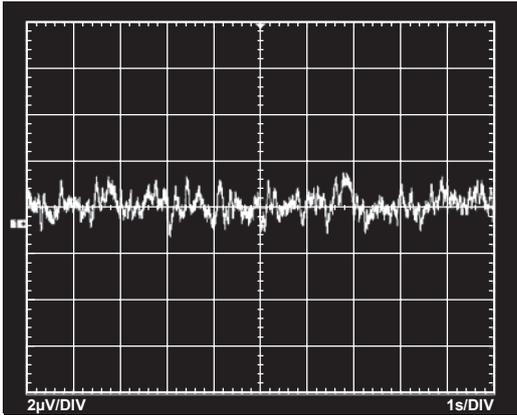


Figure 28. 0.1 Hz to 10 Hz RTI Voltage Noise (G = 1)

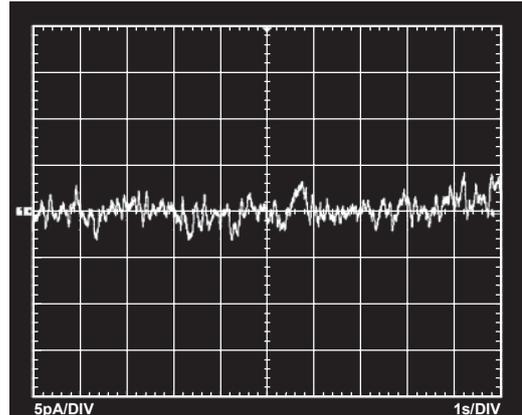


Figure 31. 0.1 Hz to 10 Hz Current Noise

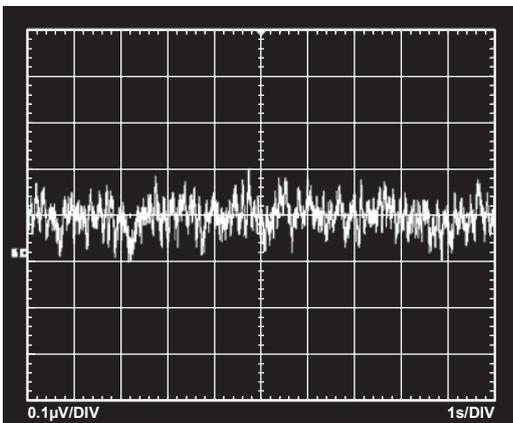


Figure 29. 0.1 Hz to 10 Hz RTI Voltage Noise (G = 1000)

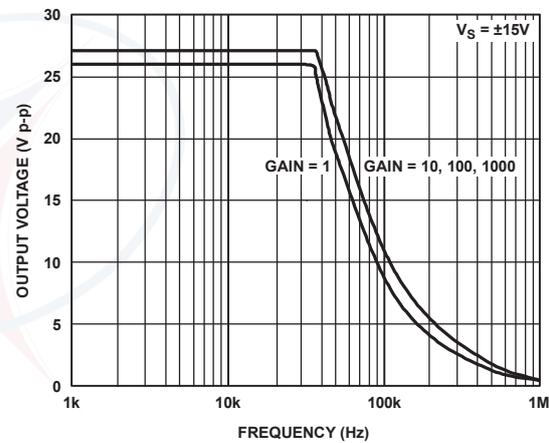


Figure 32. Large Signal Frequency Response

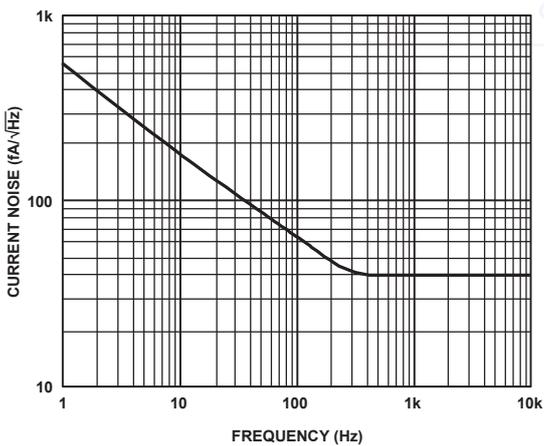


Figure 30. Current Noise Spectral Density vs. Frequency

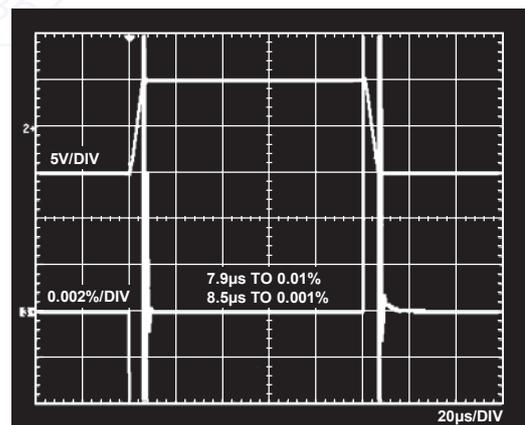


Figure 33. Large Signal Pulse Response and Settling Time (G = 1), 0.002%/DIV

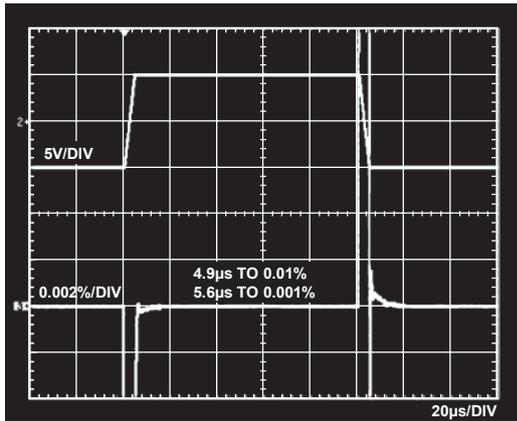


Figure 34. Large Signal Pulse Response and Settling Time ($G = 10$), 0.002%/DIV

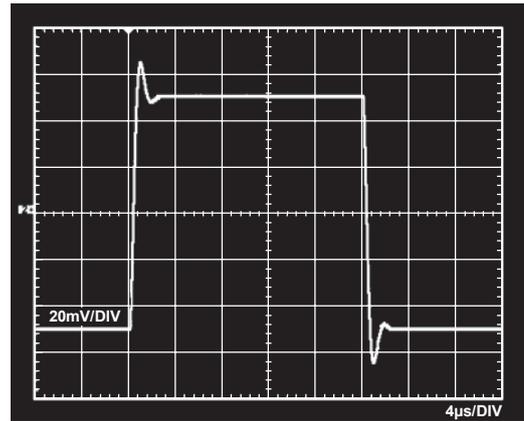


Figure 37. Small Signal Response, $G = 1$, $R_L = 2\text{ k}\Omega$, $C_L = 100\text{ pF}$

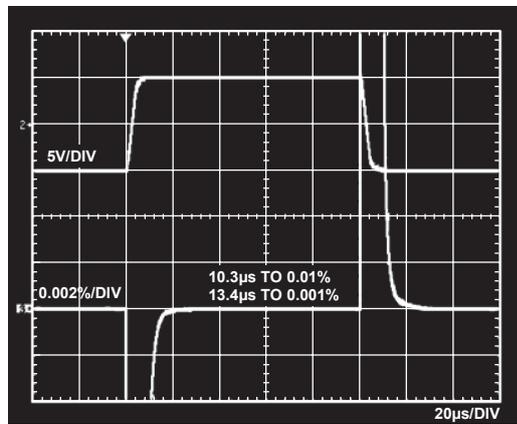


Figure 35. Large Signal Pulse Response and Settling Time ($G = 100$), 0.002%/DIV

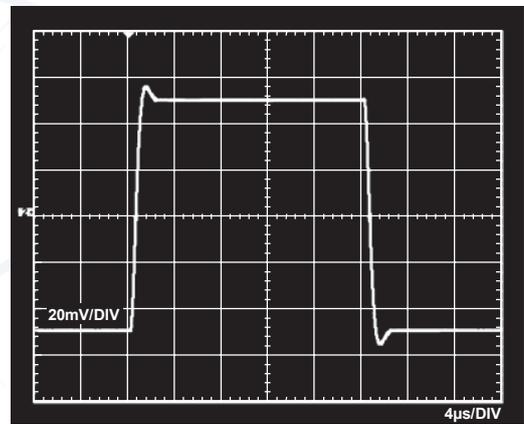


Figure 38. Small Signal Response, $G = 10$, $R_L = 2\text{ k}\Omega$, $C_L = 100\text{ pF}$

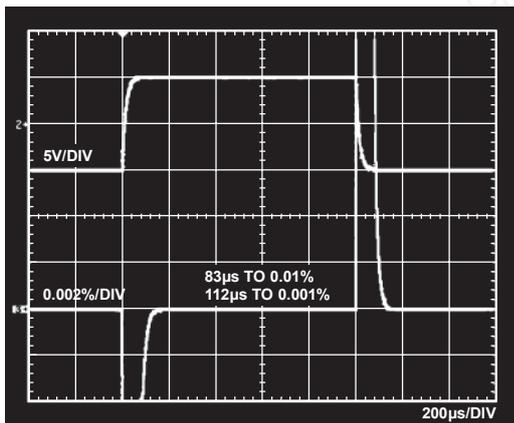


Figure 36. Large Signal Pulse Response and Settling Time ($G = 1000$), 0.002%/DIV

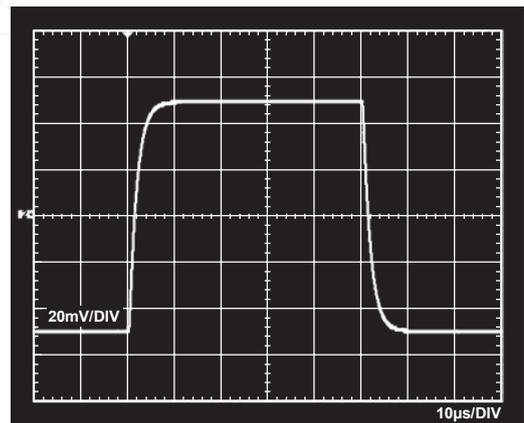


Figure 39. Small Signal Response, $G = 100$, $R_L = 2\text{ k}\Omega$, $C_L = 100\text{ pF}$

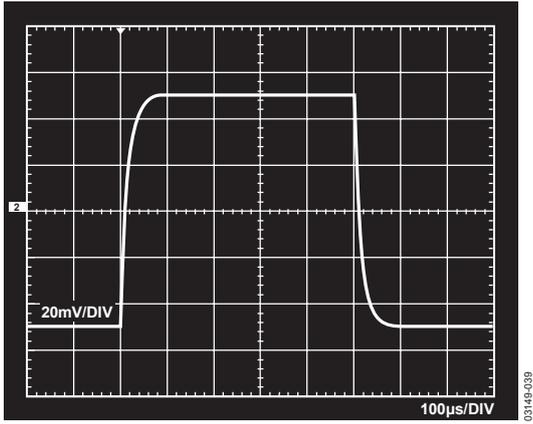


Figure 40. Small Signal Response, $G = 1000$, $R_L = 2\text{ k}\Omega$, $C_L = 100\text{ pF}$

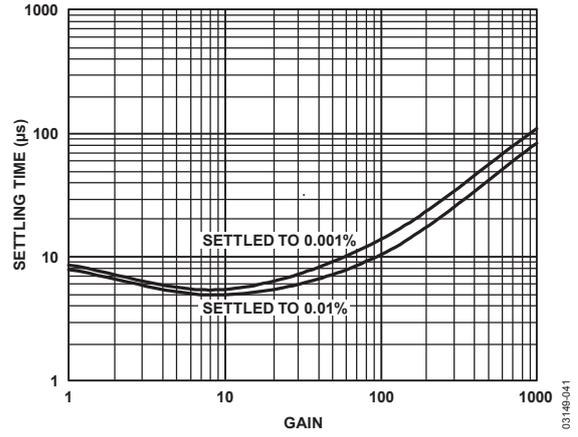


Figure 42. Settling Time vs. Gain for a 10 V Step

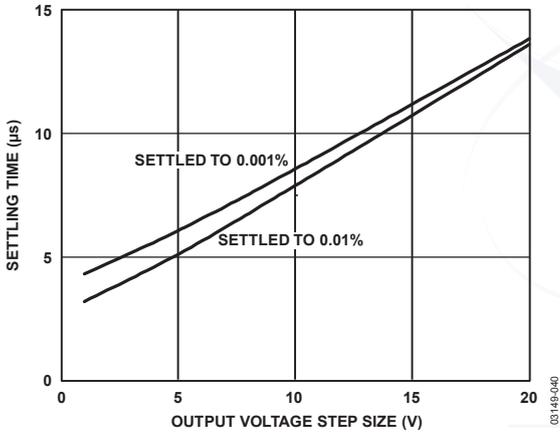


Figure 41. Settling Time vs. Step Size ($G = 1$)

THEORY OF OPERATION

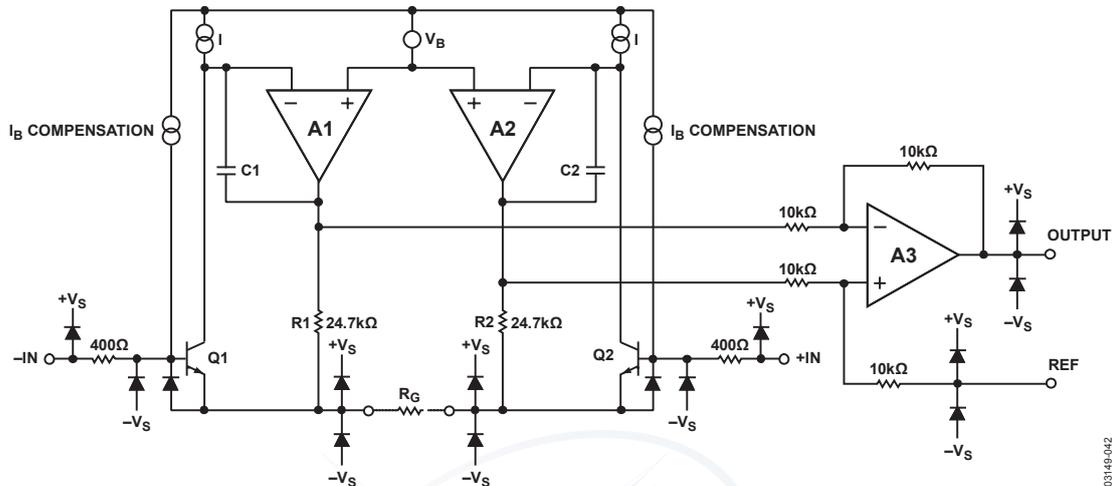


Figure 43. Simplified Schematic

The AD8221 is a monolithic instrumentation amplifier based on the classic 3-op amp topology. Input transistors Q1 and Q2 are biased at a fixed current so that any differential input signal forces the output voltages of A1 and A2 to change accordingly. A signal applied to the input creates a current through R_G , R1, and R2, such that the outputs of A1 and A2 deliver the correct voltage. Topologically, Q1, A1, R1 and Q2, A2, R2 can be viewed as precision current feedback amplifiers. The amplified differential and common-mode signals are applied to a difference amplifier that rejects the common-mode voltage but amplifies the differential voltage. The difference amplifier employs innovations that result in low output offset voltage as well as low output offset voltage drift. Laser-trimmed resistors allow for a highly accurate in-amp with gain error typically less than 20 ppm and CMRR that exceeds 90 dB ($G = 1$).

Using superbeta input transistors and an I_B compensation scheme, the AD8221 offers extremely high input impedance, low I_B , low I_B drift, low I_{OS} , low input bias current noise, and extremely low voltage noise of $8 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$.

The transfer function of the AD8221 is

$$G = 1 + \frac{49.4 \text{ k}\Omega}{R_G}$$

Users can easily and accurately set the gain using a single standard resistor.

Because the input amplifiers employ a current feedback architecture, the gain-bandwidth product of the AD8221 increases with gain, resulting in a system that does not suffer from the expected bandwidth loss of voltage feedback architectures at higher gains.

To maintain precision even at low input levels, special attention was given to the design and layout of the AD8221, resulting in an in-amp whose performance satisfies the most demanding applications.

A unique pinout enables the AD8221 to meet a CMRR specification of 80 dB at 10 kHz ($G = 1$) and 110 dB at 1 kHz ($G = 1000$). The balanced pinout, shown in Figure 44, reduces the parasitics that had, in the past, adversely affected CMRR performance. In addition, the new pinout simplifies board layout because associated traces are grouped together. For example, the gain setting resistor pins are adjacent to the inputs, and the reference pin is next to the output.

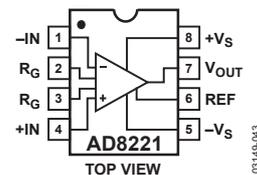


Figure 44. Pinout Diagram

AD8221

GAIN SELECTION

Placing a resistor across the R_G terminals set the gain of AD8221, which can be calculated by referring to Table 6 or by using the gain equation.

$$R_G = \frac{49.4 \text{ k}\Omega}{G - 1}$$

Table 6. Gains Achieved Using 1% Resistors

1% Standard Table Value of R_G (Ω)	Calculated Gain
49.9 k	1.990
12.4 k	4.984
5.49 k	9.998
2.61 k	19.93
1.00 k	50.40
499	100.0
249	199.4
100	495.0
49.9	991.0

The AD8221 defaults to $G = 1$ when no gain resistor is used. Gain accuracy is determined by the absolute tolerance of R_G . The TC of the external gain resistor increases the gain drift of the instrumentation amplifier. Gain error and gain drift are kept to a minimum when the gain resistor is not used.

LAYOUT

Careful board layout maximizes system performance. Traces from the gain setting resistor to the R_G pins should be kept as short as possible to minimize parasitic inductance. To ensure the most accurate output, the trace from the REF pin should either be connected to the local ground of the AD8221, as shown in Figure 47, or connected to a voltage that is referenced to the local ground of the AD8221.

Common-Mode Rejection

One benefit of the high CMRR over frequency of the AD8221 is that it has greater immunity to disturbances, such as line noise and its associated harmonics, than do typical instrumentation amplifiers. Typically, these amplifiers have CMRR fall-off at 200 Hz; common-mode filters are often used to compensate for this shortcoming. The AD8221 is able to reject CMRR over a greater frequency range, reducing the need for filtering.

A well implemented layout helps to maintain the high CMRR over frequency of the AD8221. Input source impedance and capacitance should be closely matched. In addition, source resistance and capacitance should be placed as close to the inputs as permissible.

Grounding

The output voltage of the AD8221 is developed with respect to the potential on the reference terminal. Care should be taken to tie REF to the appropriate local ground.

In mixed-signal environments, low level analog signals need to be isolated from the noisy digital environment. Many ADCs have separate analog and digital ground pins. Although it is convenient to tie both grounds to a single ground plane, the current traveling through the ground wires and PC board may cause hundreds of millivolts of error. Therefore, separate analog and digital ground returns should be used to minimize the current flow from sensitive points to the system ground. An example layout is shown in Figure 45 and Figure 46.

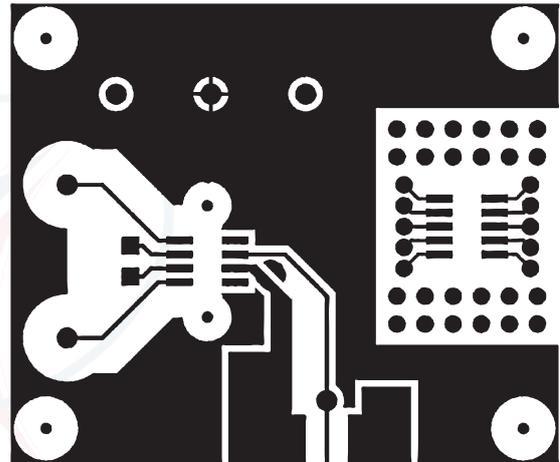


Figure 45. Top Layer of the AD8221-EVAL

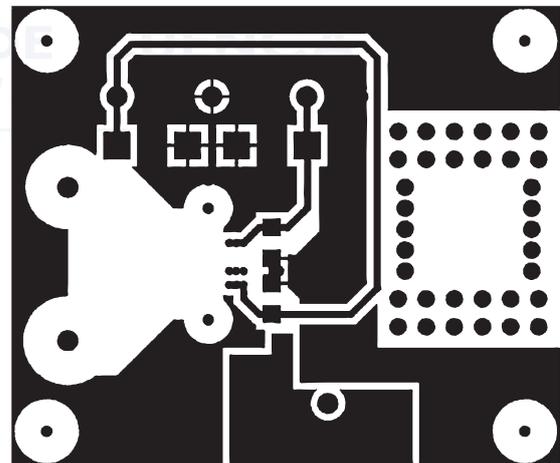


Figure 46. Bottom Layer of the AD8221-EVAL

REFERENCE TERMINAL

As shown in Figure 43, the reference terminal, REF, is at one end of a 10 k Ω resistor. The output of the instrumentation amplifier is referenced to the voltage on the REF terminal; this is useful when the output signal needs to be offset to a precise midsupply level. For example, a voltage source can be tied to the REF pin to level-shift the output so that the AD8221 can interface with an ADC. The allowable reference voltage range is a function of the gain, input, and supply voltage. The REF pin should not exceed either +V_S or -V_S by more than 0.5 V.

For best performance, source impedance to the REF terminal should be kept low, because parasitic resistance can adversely affect CMRR and gain accuracy.

POWER SUPPLY REGULATION AND BYPASSING

A stable dc voltage should be used to power the instrumentation amplifier. Noise on the supply pins can adversely affect performance. Bypass capacitors should be used to decouple the amplifier.

A 0.1 μ F capacitor should be placed close to each supply pin. As shown in Figure 47, a 10 μ F tantalum capacitor can be used further away from the part. In most cases, it can be shared by other precision integrated circuits.

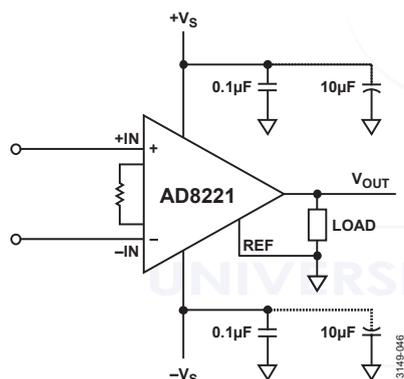
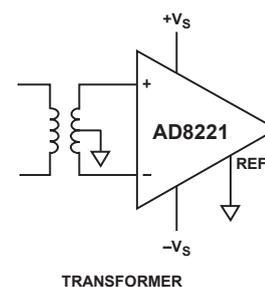


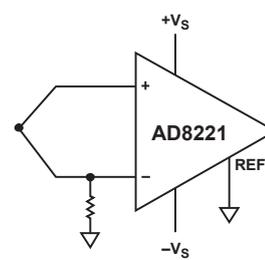
Figure 47. Supply Decoupling, REF, and Output Referred to Local Ground

INPUT BIAS CURRENT RETURN PATH

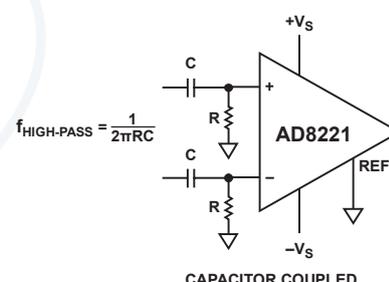
The input bias current of the AD8221 must have a return path to common. When the source, such as a thermocouple, cannot provide a return current path, one should be created, as shown in Figure 48.



TRANSFORMER



THERMOCOUPLE



CAPACITOR COUPLED

Figure 48. Creating an I_{BIAS} Path

INPUT PROTECTION

All terminals of the AD8221 are protected against ESD, 1 kV Human Body Model. In addition, the input structure allows for dc overload conditions below the negative supply, -V_S. The internal 400 Ω resistors limit current in the event of a negative fault condition. However, in the case of a dc overload voltage above the positive supply, +V_S, a large current flows directly through the ESD diode to the positive rail. Therefore, an external resistor should be used in series with the input to limit current for voltages above +V_S. In either scenario, the AD8221 can safely handle a continuous 6 mA current, $I = V_{IN}/R_{EXT}$ for positive overvoltage and $I = V_{IN}/(400 \Omega + R_{EXT})$ for negative overvoltage.

For applications where the AD8221 encounters extreme overload voltages, as in cardiac defibrillators, external series resistors, and low leakage diode clamps, such as BAV199Ls, FJH1100s, or SP720s should be used.

AD8221

RF INTERFERENCE

RF rectification is often a problem when amplifiers are used in applications where there are strong RF signals. The disturbance can appear as a small dc offset voltage. High frequency signals can be filtered with a low-pass RC network placed at the input of the instrumentation amplifier, as shown in Figure 49. The filter limits the input signal bandwidth according to the following relationship:

$$FilterFreq_{Diff} = \frac{1}{2\pi R(2C_D + C_C)}$$

$$FilterFreq_{CM} = \frac{1}{2\pi RC_C}$$

where $C_D \geq 10C_C$

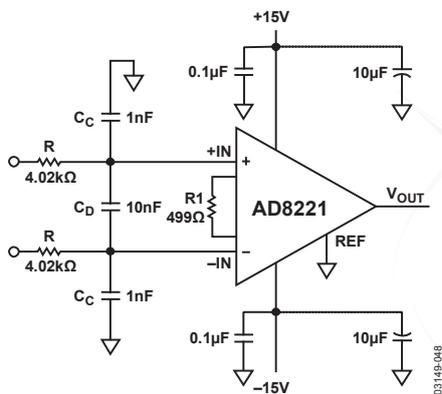


Figure 49. RFI Suppression

C_D affects the difference signal, and C_C affects the common-mode signal. Values of R and C_C should be chosen to minimize RFI. Mismatch between the $R \times C_C$ at the positive input and the $R \times C_C$ at the negative input degrades the CMRR of the AD8221. By using a value of C_D one magnitude larger than C_C , the effect of the mismatch is reduced, and therefore, performance is improved.

PRECISION STRAIN GAGE

The low offset and high CMRR over frequency of the AD8221 make it an excellent candidate for bridge measurements. As shown in Figure 50, the bridge can be directly connected to the inputs of the amplifier.

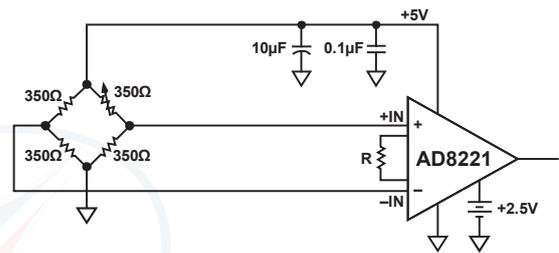


Figure 50. Precision Strain Gage

CONDITIONING ±10 V SIGNALS FOR A +5 V DIFFERENTIAL INPUT ADC

There is a need in many applications to condition ±10 V signals. However, many of today's ADCs and digital ICs operate on much lower, single-supply voltages. Furthermore, new ADCs have differential inputs because they provide better common-mode rejection, noise immunity, and performance at low supply voltages. Interfacing a ±10 V, single-ended instrumentation amplifier to a +5 V, differential ADC can be a challenge. Interfacing the instrumentation amplifier to the ADC requires attenuation and a level shift. A solution is shown in Figure 51.

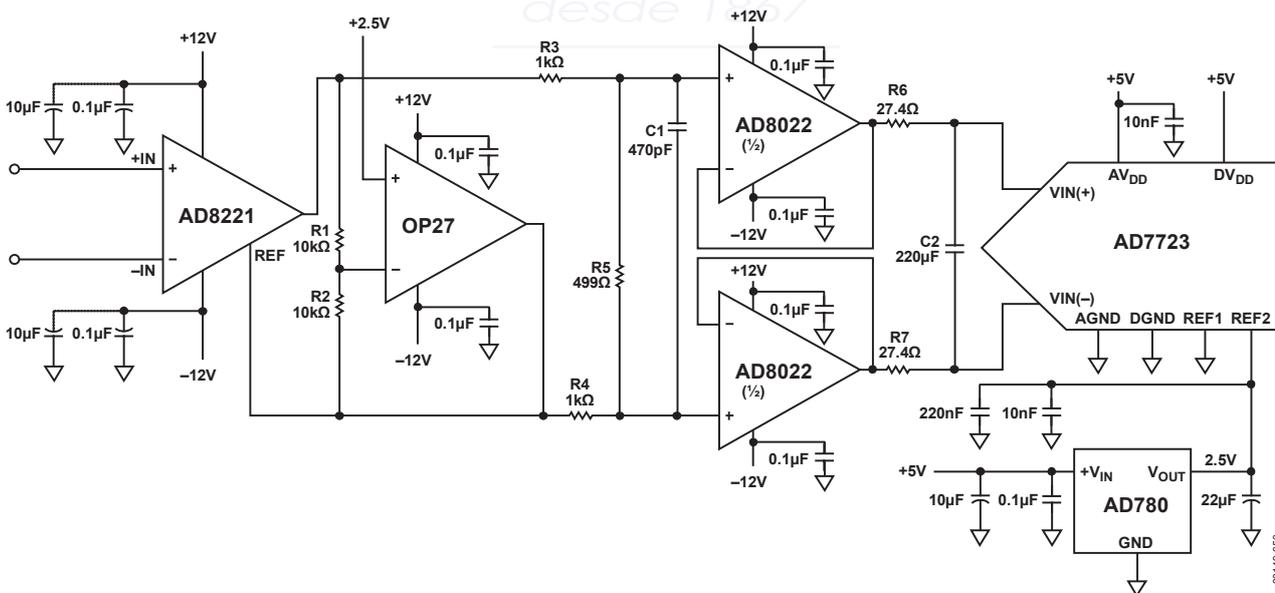


Figure 51. Interfacing to a Differential Input ADC

In this topology, an OP27 sets the reference voltage of the AD8221. The output signal of the instrumentation amplifier is taken across the OUT pin and the REF pin. Two 1 k Ω resistors and a 499 Ω resistor attenuate the ± 10 V signal to +4 V. An optional capacitor, C1, can serve as an antialiasing filter. An AD8022 is used to drive the ADC.

This topology has five benefits. In addition to level-shifting and attenuation, very little noise is contributed to the system. Noise from R1 and R2 is common to both of the inputs of the ADC and is easily rejected. R5 adds a third of the dominant noise and therefore makes a negligible contribution to the noise of the system. The attenuator divides the noise from R3 and R4. Likewise, its noise contribution is negligible. The fourth benefit of this interface circuit is that the acquisition time of the AD8221 is reduced by a factor of 2. With the help of the OP27, the AD8221 only needs to deliver one-half of the full swing; therefore, signals can settle more quickly. Lastly, the AD8022 settles quickly, which is helpful because the shorter the settling time, the more bits that can be resolved when the ADC acquires data. This configuration provides attenuation, a level-shift, and a convenient interface with a differential input ADC while maintaining performance.

AC-COUPLED INSTRUMENTATION AMPLIFIER

Measuring small signals that are in the noise or offset of the amplifier can be a challenge. Figure 52 shows a circuit that can improve the resolution of small ac signals. The large gain

reduces the referred input noise of the amplifier to 8 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$. Thus, smaller signals can be measured because the noise floor is lower. DC offsets that would have been gained by 100 are eliminated from the output of the AD8221 by the integrator feedback network.

At low frequencies, the OP1177 forces the output of the AD8221 to 0 V. Once a signal exceeds $f_{\text{HIGH-PASS}}$, the AD8221 outputs the amplified input signal.

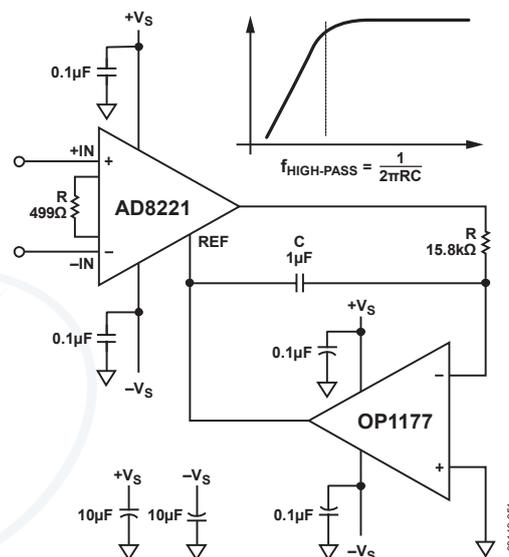


Figure 52. AC-Coupled Circuit

AD8221

DIE INFORMATION

Die size: 1575 μm \times 2230 μm

Die thickness: 381 μm

To minimize gain errors introduced by the bond wires, use Kelvin connections between the chip and the gain resistor, R_G , by connecting Pad 2A and Pad 2B in parallel to one end of R_G and Pad 3A and Pad 3B in parallel to the other end of R_G . For unity gain applications where R_G is not required, Pad 2A and Pad 2B must be bonded together as well as the Pad 3A and Pad 3B.



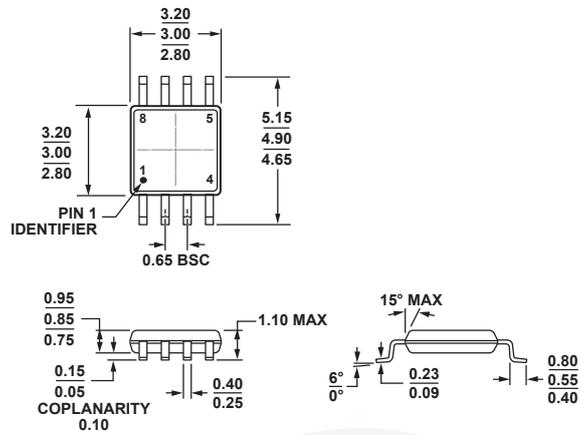
Figure 53. Bond Pad Diagram

Table 7. Bond Pad Information

Pad No.	Mnemonic	Pad Coordinates ¹	
		X (μm)	Y (μm)
1	-IN	-379	+951
2A	R_G	-446	+826
2B	R_G	-615	+474
3A	R_G	-619	+211
3B	R_G	-490	-190
4	+IN	-621	-622
5	$-V_S$	+635	-823
6	REF	+649	-339
7	V_{OUT}	+612	+84
8	$+V_S$	+636	+570

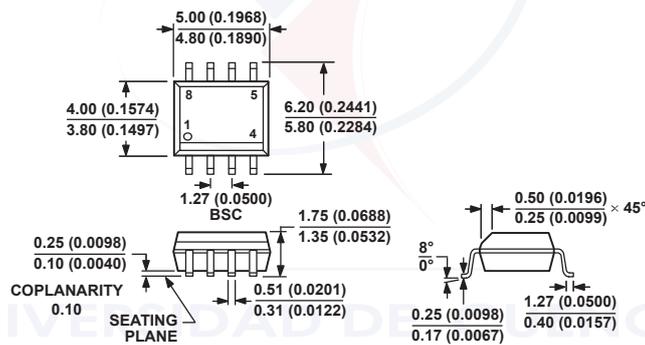
¹ The pad coordinates indicate the center of each pad, referenced to the center of the die. The die orientation is indicated by the logo, as shown in Figure 53.

OUTLINE DIMENSIONS



COMPLIANT TO JEDEC STANDARDS MO-187-AA
 Figure 54. 8-Lead Mini Small Outline Package [MSOP] (RM-8)
 Dimensions shown in millimeters

10-07-2009-B



COMPLIANT TO JEDEC STANDARDS MS-012-AA
 CONTROLLING DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS; INCH DIMENSIONS (IN PARENTHESES) ARE ROUNDED-OFF MILLIMETER EQUIVALENTS FOR REFERENCE ONLY AND ARE NOT APPROPRIATE FOR USE IN DESIGN.
 Figure 55. 8-Lead Standard Small Outline Package [SOIC_N] Narrow Body (R-8)
 Dimensions shown in millimeters and (inches)

012407-A

AD8221

ORDERING GUIDE

Model ¹	Temperature Range for Specified Performance	Operating ² Temperature Range	Package Description	Package Option	Branding
AD8221AR	-40°C to +85°C	-40°C to +125°C	8-Lead SOIC_N	R-8	
AD8221AR-REEL	-40°C to +85°C	-40°C to +125°C	8-Lead SOIC_N, 13" Tape and Reel	R-8	
AD8221AR-REEL7	-40°C to +85°C	-40°C to +125°C	8-Lead SOIC_N, 7" Tape and Reel	R-8	
AD8221ARZ	-40°C to +85°C	-40°C to +125°C	8-Lead SOIC_N	R-8	
AD8221ARZ-R7	-40°C to +85°C	-40°C to +125°C	8-Lead SOIC_N, 7" Tape and Reel	R-8	
AD8221ARZ-RL	-40°C to +85°C	-40°C to +125°C	8-Lead SOIC_N, 13" Tape and Reel	R-8	
AD8221ARM	-40°C to +85°C	-40°C to +125°C	8-Lead MSOP	RM-8	JLA
AD8221ARM-REEL	-40°C to +85°C	-40°C to +125°C	8-Lead MSOP, 13" Tape and Reel	RM-8	JLA
AD8221ARM REEL7	-40°C to +85°C	-40°C to +125°C	8-Lead MSOP, 7" Tape and Reel	RM-8	JLA
AD8221ARMZ	-40°C to +85°C	-40°C to +125°C	8-Lead MSOP	RM-8	JLA#
AD8221ARMZ-R7	-40°C to +85°C	-40°C to +125°C	8-Lead MSOP, 7" Tape and Reel	RM-8	JLA#
AD8221ARMZ-RL	-40°C to +85°C	-40°C to +125°C	8-Lead MSOP, 13" Tape and Reel	RM-8	JLA#
AD8221BR	-40°C to +85°C	-40°C to +125°C	8-Lead SOIC_N	R-8	
AD8221BR-REEL	-40°C to +85°C	-40°C to +125°C	8-Lead SOIC_N, 13" Tape and Reel	R-8	
AD8221BR-REEL7	-40°C to +85°C	-40°C to +125°C	8-Lead SOIC_N, 7" Tape and Reel	R-8	
AD8221BRZ	-40°C to +85°C	-40°C to +125°C	8-Lead SOIC_N	R-8	
AD8221BRZ-R7	-40°C to +85°C	-40°C to +125°C	8-Lead SOIC_N, 7" Tape and Reel	R-8	
AD8221BRZ-RL	-40°C to +85°C	-40°C to +125°C	8-Lead SOIC_N, 13" Tape and Reel	R-8	
AD8221AC-P7	-40°C to +85°C	-40°C to +125°C	Die		

¹ Z = RoHS Compliant Part, # denotes RoHS compliant product may be top or bottom marked.

² See Typical Performance Characteristics for expected operation from 85°C to 125°C.

UNIVERSIDAD DE CUENCA
desde 1867



Bibliografía

- [1] M. Villarrubia, *Energía eólica*. Barcelona: Ed. CEAC, 2004.
- [2] R. Ruiz Nieto, “Diseño mecánico de un aerogenerador eólico,” Ph.D. dissertation, Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de Bilbao, 2015.
- [3] D. Li, G. Song, L. Ren, H. Li, y S.-C. M. Ho, “A review of damage detection methods for wind turbine blades,” *Smart Materials and Structures (Print)*, vol. 24, num. 3, p. 24, 2015.
- [4] D. M. Siringoringo y Y. Fujino, “Experimental study of laser Doppler vibrometer and ambient vibration for vibration-based damage detection ,” pp. 1803–1815, nov 2006. [En línea]. Disponible: <http://www.scopus.com/inward/record.url?scp=33750629462&partnerID=8YFLogxK>
<http://www.scopus.com/inward/citedby.url?scp=33750629462&partnerID=8YFLogxK>
- [5] J. Escalera Siles, “Estudio aerodinámico de un aerogenerador mediante teoría BEM (Blade Element Momentum),” Ph.D. dissertation, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial i Aeronáutica de Terrassa, 2014. [En línea]. Disponible: <http://hdl.handle.net/2099.1/24389>
- [6] J. Elizondo Martínez, “Diseño, Manufactura y Caracterización Experimental de Aspas y Controlador de Carga Resistiva para una Turbina de Viento Bergey BWC XLI-Edición Única,” Ph.D. dissertation, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, 2007. [En línea]. Disponible: <http://hdl.handle.net/11285/568235>
- [7] C. Espejo Marín, “Energía eólica en España,” *Investigaciones Geográficas (Esp)*, num. 35, pp. 45–65, jan 2004. [En línea]. Disponible: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=17603503>
- [8] M. E. González-Ávila, L. F. Beltrán-Morales, E. Troyo Diéguez, y A. Ortega-Rubio, “Potencial de aprovechamiento de la energía eólica para la generación de energía eléctrica en zonas rurales de México,” *Interciencia*, vol. 31, num. 4, pp. 240–245, jan 2006. [En línea]. Disponible: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33911502>



- [9] K. Papadopoulos, E. Morfiadakis, T. P. Philippidis, y D. J. Lekou, "Assessment of the strain gauge technique for measurement of wind turbine blade loads," *Wind Energy*, vol. 3, num. 1, pp. 35–65, 2000. [En línea]. Disponible: [http://dx.doi.org/10.1002/1099-1824\(200001/03\)3:1%3C35::AID-WE30%3E3.0.COhttp://2-d](http://dx.doi.org/10.1002/1099-1824(200001/03)3:1%3C35::AID-WE30%3E3.0.COhttp://2-d)
- [10] P. Tech4CDM, "La Energía Eólica En ECUADOR," 2008. [En línea]. Disponible: <http://www.tech4cdm.com>
- [11] J. Carr, C. Niezrecki, y P. Avitabile, "Full Field Dynamic Strain on Wind Turbine Blade Using Digital Image Correlation Techniques and Limited Sets of Measured Data from Photogrammetric Targets BT - Dynamics of Coupled Structures, Volume 1: Proceedings of the 32nd IMAC, A Conference and Expos," M. Allen, R. Mayes, y D. Rixen, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2014, pp. 317–328. [En línea]. Disponible: https://doi.org/10.1007/978-3-319-04501-6_{ }30
- [12] D. W. Lim, S. C. Mantell, P. J. Seiler, y R. Yang, "Wind turbine blades as a strain energy source for energy harvesting," 2013. [En línea]. Disponible: <http://www.scopus.com/inward/record.url?scp=84881464612{&}partnerID=8YFLogxKhttp://www.scopus.com/inward/citedby.url?scp=84881464612{&}partnerID=8YFLogxK>
- [13] A. Cooperman y M. Martinez, "Load monitoring for active control of wind turbines," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 41, pp. 189–201, 2015. [En línea]. Disponible: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114007059>
- [14] J. Berg, B. Resor, J. Paquette, y J. White, "SMART Wind Turbine Rotor : Design and Field Test," Wind Energy Technologies Department, Albuquerque, New Mexico, Tech. Rep., 2014. [En línea]. Disponible: <http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/2014/140681.pdf>
- [15] T. Verbruggen, L. Rademakers, y H. Braam, "Fibre Optic Blade Monitoring for optimisation of offshore wind farm O&M," p. 46, 2012.
- [16] D. Castagnet, T. Barlas, T. Buhl, N. Poulsen, J. Wedel-Heinen, N. Olesen, C. Bak, y T. Kim, "Full-scale test of trailing edge flaps on a Vestas V27 wind turbine: active load reduction and system identification," *Wind Energy*, vol. 17, num. 4, pp. 549–564, 2014. [En línea]. Disponible: <http://dx.doi.org/10.1002/we.1589>
- [17] M. Ozbek y D. Rixen, "Monitoring the Dynamics of Large Wind Turbines in Operation Using Optical Measurement Techniques," we@sea, Tech. Rep., 2007.
- [18] N. Dr. Post, "Improving Bending Moment Measurements on Wind Turbine Blades," CO (United States), 2016. [En línea]. Disponible: <https://www.nrel.gov/docs/fy16osti/65996.pdf>



- [19] R. A. Swartz, J. P. Lynch, S. Zerbst, B. Sweetman, y R. Rolfes, “Structural monitoring of wind turbines using wireless sensor networks,” *Smart Structures and Systems*, vol. 6, 2010.
- [20] N. N. en la Red, *MF0617_3, Gestión del mantenimiento de instalaciones de energía eólica*. Málaga: Nuevos Negocios en la Red, 2014.
- [21] A. P. Talayero Novales, *Energía eólica*, 1ra ed. Zaragoza: Prensas Univ. de Zaragoza, 2008.
- [22] J. Mur Amada, “Curso de Energía Eólica,” Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Zaragoza, Zaragoza, Tech. Rep., 2008. [En línea]. Disponible: www.windygrid.org/manualEolico.pdf
- [23] G. M. C. N. T. M. . Masters, *Renewable and efficient electric power systems*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2004.
- [24] G. Buxton, *Alternative energy technologies: an introduction with computer simulations*. Boca Raton, FL: CRC Press Taylor & Francis Group, 2015.
- [25] C. Martín Mayordomo, “Análisis de la fiabilidad y disponibilidad de los aerogeneradores,” Ph.D. dissertation, Universidad de Valladolid, 2015.
- [26] M. Leal Rubio, A. Domínguez, A. León Reneses, A. Arbeteta Durán, y E. Lechosa Urquijo, “Diseño de aerogeneradores,” Ph.D. dissertation, 2017.
- [27] S. Tian, Z. Yang, X. Chen, y Y. Xie, “Damage Detection Based on Static Strain Responses Using FBG in a Wind Turbine Blade,” 2015.
- [28] J. Sierra-Pérez, M. A. Torres-Arredondo, y A. Güemes, “Damage and nonlinearities detection in wind turbine blades based on strain field pattern recognition. FBGs, OBR and strain gauges comparison,” *Composite Structures*, vol. 135, pp. 156–166, 2016. [En línea]. Disponible: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822315008351>
- [29] A. Ghoshal, M. J. Sundaresan, M. J. Schulz, y P. Frank Pai, “Structural health monitoring techniques for wind turbine blades,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 85, num. 3, pp. 309–324, 2000. [En línea]. Disponible: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167610599001324>
- [30] National Instruments, “Measuring Strain with Strain Gages - National Instruments,” 2016. [En línea]. Disponible: <http://www.ni.com/white-paper/3642/en/>
- [31] National Instruments, “Acondicionamiento para Señales de Galgas Extensiométricas - National Instruments,” 2007. [En línea]. Disponible: <http://www.ni.com/white-paper/5911/es/>



- [32] Analog Devices, “Precision instrumentation amplifier AD8221,” 2017. [En línea]. Disponible: www.analog.com
- [33] O. Al-Khudairi, H. Hadavinia, C. Little, G. Gillmore, P. Greaves, y K. Dyer, “Full-Scale Fatigue Testing of a Wind Turbine Blade in Flapwise Direction and Examining the Effect of Crack Propagation on the Blade Performance,” *Materials*, vol. 10, num. 10, p. 1152, oct 2017. [En línea]. Disponible: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5666958/>
- [34] K. S. Hansen, K. O. Helgesen Pedersen, y U. Schmidt Paulsen, “Online wind turbine measurement laboratory ,” 2006.
- [35] H. Dr. Martinez Alfaro, *Métodos Numéricos*, Monterrey, 2004. [En línea]. Disponible: <http://www.mty.itesm.mx/dtie/deptos/cb/cb00854-1/Apuntes/HMA/MNIeI.pdf>



UNIVERSIDAD DE CUENCA
desde 1867