



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN INGENIERIA
CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN ENERGÍA

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PRUEBA DEL SISTEMA DE CONTROL
DE UN AEROGENERADOR DE BAJA POTENCIA.**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
ING. ANTONIO VERDE AÑORVE

TUTORES:
M.C. JOSÉ CAMPOS ALVAREZ. **CIE-UNAM**
DR. ORLANDO LASTRES DANGUILLECOURT. **UNISTMO.**

MIEMBROS DEL COMITÉ DE TUTOR
DR. ARRÓN SÁNCHEZ JUÁREZ. **CIE-UNAM.**
DR. JOSEPH SEBASTIÁN PATHIYAMATTON. **CIE-UNAM**
DR. GEOVANNI HERNÁNDEZ GALVEZ. **UPEG**

MÉXICO, D.F. ENERO 2013



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Aarón Sanchez Juárez.

Secretario: M.C. José Campos Alvarez.

Vocal: Dr. Orlando Lastres Danguillecourt.

1^{er}. Suplente: Dr. Joseph Sebastián Pathiyamatton.

2^{do}. Suplente: Dr. Geovanni Hernandez Galvez.

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:

Centro de Investigación en Energía, Temixco, Morelos.

Universidad del Istmo Campus Tehuantepec, Tehuantepec, Oaxaca

TUTORES DE TESIS:

M.C. José Campos Alvarez

Dr. Orlando Lastres Danguillecourt

FIRMA

Resumen

En este trabajo se presenta el diseño, construcción y prueba del sistema de control de un aerogenerador de baja potencia. El sistema de control tiene como objetivo operar el aerogenerador de forma automática y fiable. Para lograr este objetivo se diseñó el sistema de control en función de las características del aerogenerador, el cual se dividió en tres subsistemas: sistema de supervisión y control, sistema de comunicación y sistema central.

El sistema de supervisión y control está formado por dos tarjetas electrónicas: La tarjeta de supervisión monitorea las variables voltaje, corriente, velocidad angular del rotor eólico, temperatura y vibración, y la tarjeta de control que se encarga de encender o detener el aerogenerador.

El sistema de comunicación interconecta al sistema de supervisión y control con el sistema central. Se utilizaron dos módulos XBee-Pro 900 para realizar la comunicación de forma inalámbrica durante las pruebas de campo.

El sistema central es la interfaz entre el operador y el aerogenerador, se realizó un programa en el software LabView que procesa, visualiza y almacenan en tiempo real las mediciones de las variables de campo.

Además se diseñó e implementó un sistema de regulación de carga electrónica que permite evaluar el aerogenerador ante la presencia de velocidades de viento superiores a la velocidad nominal.

Por último se presentan los resultados obtenidos con el sistema de control en forma gráfica de un día de evaluación del aerogenerador para observar su comportamiento ante la presencia de diferentes regímenes de viento, demostrando que se logró el objetivo de operar, monitorear, controlar y evaluar un aerogenerador de baja potencia de forma automática y fiable.

Abstract

This paper presents the design, construction and testing of the control system of a wind turbine low power. The goal of the control system is to operate automatically and reliably the turbine. To achieve this objective, the control system was designed according to the characteristics of the wind turbine, which is divided into three subsystems: monitoring and control system, communication system and the central system.

The monitoring and control system consists of two electronic boards: The supervisory board monitors the variable voltage, current, wind rotor angular velocity, temperature and vibration, and the control board that is responsible for start and stop the turbine.

The communication system interconnects the monitoring and control system to the central system. We used two XBee-Pro 900 for wireless communication for field testing.

The central system is the interface between the operator and the turbine. We performed a program in the LabView software that processes, stores and displays in real-time the measurements of the field variables.

Also, we designed and implemented a system of electronic load regulation that allows us to evaluate the wind turbine with wind speeds higher than the rated speed.

Finally we present the results obtained with the control system in graphical form for an test day of the turbine with the purpose of observe its behavior in the presence of different wind regimes, demonstrating that the objective was achieved to operate, monitor, control and evaluate a low power turbine automatically and reliably.

Dedicatoria

*Dedico esta tesis a Dios,
a mi padre Jesús Antonio,
a mi madre Francisca ,
a mis hermanas Wendy Paola y María José,
a mi hermano Gilberto Francisco y a toda mi familia
que con su amor, cariño, confianza y ejemplo
me ha permitido superarme día con día.
Les agradezco de corazón su apoyo.*

Agradecimientos

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México y al Centro de Investigación en Energía por proporcionarme la atención y los recursos necesarios para el desarrollo del proyecto de investigación.

Agradezco a mis tutores de tesis Dr. Orlando Lastres Danguillecourt y M.C. José Campos Álvarez por su constante apoyo tanto en el área académico con en el área personal. A los sinodales Dr. Joseph Sebastian Pathiyamattom, Dr. Aarón Sánchez Juárez y Dr. Geovanni Hernández Galvez por sus aportes en la revisión y culminación de la tesis.

Agradezco con mucho cariño a M.I. Laura Elene Vereza Valladares por su incondicional apoyo durante el transcurso del desarrollo de este proyecto.

Agradezco al CONACYT por el apoyo económico brindado para la realización de la maestría y la tesis.

Agradezco a la Universidad del Istmo por haberme prestado sus instalaciones para realizar el proyecto de investigación y a la empresa Acciona por el apoyo recibido para la adquisición de componentes electrónicos sin el cual no se hubiera logrado el desarrollo del proyecto.

Agradezco a mis amigos Onesimo, Francisco, Erick, Amilcar, Samuel, Dorrego, Hugo, Airel, Lili, Alejandro, Rafa, Maira, Lulú, Iris, Marco, Nahum y al Club de Basket del CIE por el apoyo recibido en la maestría.

Índice general

Resumen	3
Abstract	4
Dedicatoria	5
Agradecimientos.....	6
Índice general.....	7
Introducción.....	11
Capítulo 1. Energía eólica.	16
1.1.- El Recurso eólico y su naturaleza.....	16
1.1.1.- Mecanismos del movimiento del viento	17
1.2 Principio físico de la conversión de la energía del viento.....	22
1.3 Transformación de energía. Rendimiento	23
1.4 Clasificaciones de los aerogeneradores.	26
1.4.1 Componentes básicos de un aerogenerador.....	29
Capítulo 2. Sistema de Control.....	33
2.1 Sistema de supervisión y control.....	35
2.1.1 Sensores y actuadores	36
Voltaje.	38
Corriente.....	39
Velocidad angular.....	40
Temperatura.....	43
Vibración.	44
2.1.2 Acondicionamiento de Señal.	45
2.1.2.1. Amplificador operacional.	46
2.1.3 Sistema de adquisición de datos.	47
Calibración.....	48
Estrategia de control.....	49
2.2 Sistema de comunicación.	49
2.3 Sistema central.	50

Capítulo 3. Desarrollo experimental.	52
3.1. Diseño del sistema de supervisión y control	54
3.1.1 Corriente	57
3.1.2 Voltaje.....	58
3.1.3 Temperatura.	59
3.1.4 Velocidad angular.	61
3.1.5 Vibración.....	62
3.1.6 Fuentes de alimentación.....	63
3.1.7 Señales de entrada o salida (I/O).	63
3.1.8 Circuito principal.	65
3.1.8.1 Estrategia de control.	66
3.2 Diseño del sistema de comunicación.	73
3.3 Diseño del sistema central.	74
3.4 Diseño del sistema de regulación de carga electrónica.	80
Capítulo 4. Pruebas y resultados.....	85
Capítulo 5. Conclusiones.....	100
Bibliografía	102

Índice de figuras

Figura 1-1 Movimiento convectivo de masas de aire en la atmósfera [14].....	16
Figura 1-2. Generación de viento geostrópico debido al balance de la fuerza de presión y fuerza de Coriolis [21].....	18
Figura 1-3. Viento gradiente [21].....	18
Figura 1-4. Efecto brisa marina [14].....	20
Figura 1-5. Efecto valle- montaña [14].....	20
Figura 1-6. Efecto túnel [14].....	21
Figura 1-7. Efecto colina [14].....	21
Figura 1-8. Flujo de aire a través de un cilindro [9].....	22
Figura 1-9. Rendimiento y flujo de potencia a plena carga de un aerogenerador de 1MW. Los rendimientos incluidos son estimados [3].	25
Figura 1-10. Aerogenerador vertical Darrieus (izquierda) y Savonius (derecha) [24].	27
Figura 1-11. Turbina eólica horizontal con rotor multipala americano [3].	28
Figura 1-12. Aerogenerador con rotor de eje horizontal tipo hélice (monopala, bipala y tripala) [3].	28
Figura 1-13. Componentes de un aerogenerador.....	30
Figura 1-14. Orientación a barlovento y sotavento [14].	31
Figura 2-1. Diagrama en bloques del sistema de control de un aerogenerador.....	34
Figura 2-2. Diagrama en bloques del sistema de supervisión y control	35
Figura 2-3. Divisor de voltaje.....	38
Figura 2-4. Principio de funcionamiento de efecto Hall, campo magnético presente [22].	40
Figura 2-5. Principio de efecto Hall, sin campo magnético [22].	42
Figura 2-6. Generación de tren de pulso en base a sensor de efecto Hall	42
Figura 3-1. Curva teórica de potencia vs velocidad angular del rotor eólico [8].	53
Figura 3-2. Curvas teóricas de voltaje y corriente vs velocidad angular del rotor eólico [8].	54
Figura 3-3. Circuito general de sistema de supervisión.	56
Figura 3-4. Curva de calibración del sensor de corriente.	57
Figura 3-5. Sensor de corriente y acondicionador de señal	58
Figura 3-6. Curva de calibración del sensor de voltaje.	59
Figura 3-7. Sensor de voltaje con acondicionador de señal.	59
Figura 3-8. Curvas de calibración de los sensores de temperatura.	60
Figura 3-9. Circuito de sensores de temperatura con acondicionadores de señal.....	61
Figura 3-10. Circuito que mide la velocidad angular del rotor eólico.	62
Figura 3-11. Circuito para medir vibración.	63
Figura 3-12. Fuentes de alimentación del sistema de supervisión.	63
Figura 3-13. Señales de salida del sistema de supervisión.	64
Figura 3-14. Patigrama del microcontrolador PIC18F458.	65
Figura 3-15. Dispositivo principal del sistema de supervisión.	66
Figura 3-16. Diagrama de flujo del PIC18F458.....	68
Figura 3-17. Diagrama de flujo de las interrupciones, a) modulo captura y b) modulo recepción de dato.....	69
Figura 3-18. Tarjeta de supervisión.....	70
Figura 3-19. Circuito general de la tarjeta de frenado del aerogenerador.....	71
Figura 3-20. Tarjeta de frenado del aerogenerador de baja potencia.	73
Figura 3-21. Sistema de comunicación alámbrico.	73
Figura 3-22. Módulos inalámbricos XBee Pro 900.....	74
Figura 3-23. Diagrama de flujo del sistema central.....	76

<i>Figura 3-24. Diagrama en bloques del sistema central.</i>	77
<i>Figura 3-25. Pantalla principal del sistema central.</i>	78
<i>Figura 3-26. Historial de sensores.</i>	78
<i>Figura 3-27. Controladores del aerogenerador.</i>	79
<i>Figura 3-28. Configuración de comunicación.</i>	79
<i>Figura 3-29. Efecto teórico del sistema de regulación de carga electrónica.</i>	81
<i>Figura 3-30. Circuito general del sistema de regulación de carga electrónica.</i>	82
<i>Figura 3-31. Tarjeta del sistema de regulación de carga electrónica.</i>	83
<i>Figura 3-32. Resistencias de carga.</i>	83
<i>Figura 3-33. Estrategia de control del sistema de regulación de carga electrónica.</i>	84
<i>Figura 4-1. Prueba de circuito abierto del generador eléctrico.</i>	85
<i>Figura 4-2. Resultados de la prueba de circuito abierto del generador eléctrico.</i>	86
<i>Figura 4-3. Aerogenerador ubicado en la torre de prueba de la UNISTMO.</i>	87
<i>Figura 4-4. Inversor Hallen CTW-2KS</i>	87
<i>Figura 4-5. Pantalla principal del sistema central en operación.</i>	88
<i>Figura 4-6. Historial de sensores en operación.</i>	89
<i>Figura 4-7. Controladores del aerogenerador en operación.</i>	89
<i>Figura 4-8. Configuración de comunicación en operación.</i>	90
<i>Figura 4-9. Velocidad de viento vs tiempo.</i>	91
<i>Figura 4-10. Histograma de velocidad de viento.</i>	91
<i>Figura 4-11. Potencia vs tiempo.</i>	92
<i>Figura 4-12. Gráfica de los datos registrados con los sensores de temperatura, a) ambiente, b) generador y c) rectificador.</i>	93
<i>Figura 4-13. Efecto del sistema de regulación de carga.</i>	94
<i>Figura 4-14. Efecto de la velocidad angular del rotor eólico en la generación de potencia.</i>	95
<i>Figura 4-15. Comparativo de la curva teórica de potencia y la real en función de la velocidad angular del rotor eólico.</i>	96
<i>Figura 4-16. Voltaje generado en función de la velocidad angular del rotor eólico.</i>	97
<i>Figura 4-17. Corriente generada en función de la velocidad angular del rotor eólico.</i>	97
<i>Figura 4-18. Potencia vs velocidad de viento.</i>	98
<i>Figura 4-19. Comportamiento estructural del aerogenerador en función de la velocidad angular del rotor eólico.</i>	99

Índice de Tablas

<i>Tabla 3-1. Características del aerogenerador de baja potencia.</i>	52
<i>Tabla 3-2. Variables monitoreadas en el aerogenerador.</i>	55
<i>Tabla 3-3. Descripción de las señales de I/O.</i>	64
<i>Tabla 4-1. Valores máximos, mínimos y promedios registrados de temperatura.</i>	94

Introducción

Antecedentes

Hoy en día se tiene conocimiento del gran problema que causa la generación de energía eléctrica a partir de los combustibles fósiles, por esto es importante reemplazar estas fuentes de energía por fuentes de energía limpia. Existen diferentes alternativas para realizar esta tarea. Una de ellas es la energía eólica que, además de ser una de las fuentes de energía renovables es una opción factible para la producción de energía eléctrica.

A lo largo de la historia se ha aprovechado la transformación de la energía eólica en energía mecánica, pero su uso para la generación de energía eléctrica es más reciente.

Desde mediados de la década de los 70 se ha empleado la energía eólica como recurso para la generación de energía eléctrica en gran escala como respuesta a la crisis del petróleo y a los impactos ambientales derivados del uso de combustibles fósiles [5]. A partir de éste momento el empleo de éste recurso ha ido en aumento.

En el año del 2011, las energías renovables representaron el 20.3% del total de generación de energía eléctrica en el mundo, siendo la energía eólica la segunda fuente renovable con mayor capacidad instalada para la generación de energía eléctrica con 238 MW [17]. En la actualidad China, Estados Unidos, Alemania, España e India representan el 74% de la capacidad instalada de energía eólica en el mundo [17].

En Latinoamérica los países con mayor capacidad instalada para el aprovechamiento de energía eólica son Brasil y México con 1543 MW y 1002 MW respectivamente [17].

En México, hasta febrero del 2012, el 22.3% de la capacidad total de generación eléctrica en el país se generó a partir de fuentes renovables [17-1]. Y la energía eólica representó el 8.5% de la capacidad instalada. El potencial de ésta energía en México se estima en 71,000 MW [27].

Ya que México cuenta con un gran potencial eólico, la Comisión Reguladora de Energía (CRE) otorga permisos para el aprovechamiento de este recurso bajo diferentes esquemas, entre los que destacan [27]:

- El autoabastecimiento: generación de energía eléctrica para autoconsumo de personas físicas y morales.
- La producción independiente de Energía: generación de energía eléctrica en una planta mayor a 30 MW para venta exclusiva a la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

En cuanto al autoabastecimiento, generalmente se utilizan aerogeneradores de baja potencia para producir energía eléctrica para autoconsumo. Aunque no exista una clasificación convencional que defina los aerogeneradores de baja potencia o también llamados pequeños aerogeneradores o turbinas micro-eólicas, se considera que son aquellas que tienen una potencia instalada inferior a los 100 kW.

El empleo de aerogeneradores de baja potencia aumenta día con día dada la creciente sensibilidad hacia la problemática energética y de cambio climático actuales. Esta nueva conciencia induce a los ciudadanos a buscar y contribuir directamente con soluciones sustentables, adoptando para sus propias exigencias civiles o de pequeña empresa (turismo rural, granjas, refugios, usuarios domésticos aislados o interconectados a la red, etc.) micro instalaciones de fuentes renovables, en lugar de sistemas de generación convencionales [5].

Este panorama de creciente interés por la generación de energía eléctrica a partir del recurso eólico con el que México cuenta, exige el desarrollo de tecnología accesible que permita el abastecimiento fiable de energía para autoconsumo.

Por ello en este trabajo se presenta el diseño simulación y puesta en marcha de un sistema de control de un aerogenerador de baja potencia como un primer paso para el desarrollo de tecnología Mexicana para el aprovechamiento del recurso eólico.

Este sistema de control además de permitir la operación y evaluación de aerogeneradores de baja potencia, también constituye una herramienta para el desarrollo de proyectos de investigación para la optimización en el diseño de los aerogeneradores.

El sistema de control que se presenta en este trabajo permite operar un aerogenerador de baja potencia de forma automática y fiable ya que a través de la ubicación estratégica de sensores y su intercomunicación con el sistema de supervisión y el sistema central se logra la sincronización del movimiento de la turbina con el viento y protege al sistema de sobrevelocidades, sobrecalentamientos y sobregeneración.

También cuenta con opciones para el control de procesos de paro forzado y de elementos auxiliares que permiten mantener las mejores condiciones de operación. Esto se logra a través de la interfaz local entre el operador y el sistema central.

Este sistema de control cuenta un sistema de regulación de carga electrónica con el cual se puede evaluar el aerogenerador en presencia de velocidades de viento superiores a la velocidad nominal, lo cual constituye una herramienta para la optimización de estos sistemas. Además, este sistema de control cuenta con un sistema de comunicación inalámbrica que permite el registro de datos a una distancia de 100 m, lo que permite la interacción oportuna del usuario.

El sistema de control se puso en marcha durante un día durante el cual se comprobó su correcto funcionamiento a través del registro de señales que se encontraron dentro de los valores para los cuales fue diseñado.

Objetivo

Diseñar, construir y evaluar el sistema de control de un aerogenerador de baja potencia, que permita su funcionamiento automático y fiable, además de visualizar y registrar su comportamiento bajo diferentes regímenes de viento.

Para lograr el objetivo se diseñó el sistema de control en función de las características del aerogenerador. Se dividió el sistema de control en tres subsistemas: sistema de supervisión y control, sistema de comunicación y sistema central. Además se diseñó un sistema de regulación de carga electrónica que permite evaluar el aerogenerador ante la presencia de velocidades de viento superiores a la velocidad nominal.

Estructura del proyecto

La tesis está organizada de la siguiente manera:

Capítulo 1. Se describe como se genera el recurso eólico, se presenta el proceso de transformación de la energía cinética del viento a energía eléctrica a través del aerogenerador y se muestran las diferentes clasificaciones de aerogeneradores y los componentes que lo integran.

Capítulo 2. Se presentan los objetivos principales del sistema de control para un aerogenerador, se define la estructura del sistema de control y los elementos que conforman cada subsistema.

Capítulo 3. Se explica el desarrollo experimental del sistema de control, en este capítulo se diseñan las tarjetas del sistema de supervisión, sistema de frenado, sistema de comunicación y se diseña el sistema central, así como también se diseña la tarjeta del sistema de regulación de carga electrónica.

Capítulo 4. Se presentan las pruebas realizadas al aerogenerador de baja potencia y los resultados obtenidos del sistema de control, se observa el

comportamiento del aerogenerador en función de la presencia de diferentes regímenes de viento.

Capítulo 5. Se presentan las conclusiones del trabajo de investigación y los trabajos a futuro que se podrían realizar.

Capítulo 1. Energía eólica.

En este capítulo se hablará de cómo se genera el recurso eólico, y cómo se produce la energía eléctrica a partir de este; para ello se abordan las diferentes formas de conversión de la energía y se explican los diferentes componentes del aerogenerador haciendo énfasis en el sistema de control.

La Tierra recibe una gran cantidad de energía procedente del Sol. El 2% de esta energía se transforma en energía eólica [9], por lo cual es importante el estudio del comportamiento del recurso eólico.

1.1.- El Recurso eólico y su naturaleza.

El recurso eólico es lo que se llama comúnmente viento, que se genera debido al calentamiento desigual de la tierra. El calentamiento es más intenso en el ecuador que en los polos e indiscutiblemente mayor en el día que en la noche lo que produce la formación de celdas convectivas en las capas inferiores de la atmósfera. En la Figura 1-1 se observa un modelo simple en el cual el aire caliente tiende a subir debido a que es menos denso por lo que tiende a circular por la parte superior de la atmósfera y desciende en las zonas más frías. Por el contrario, al nivel del suelo este efecto se produce de forma inversa.

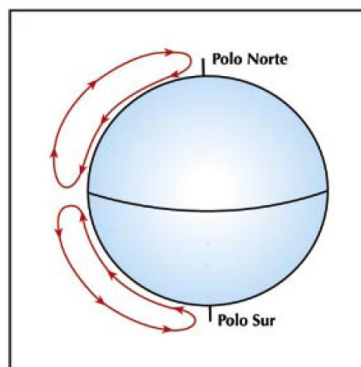


Figura 1-1 Movimiento convectivo de masas de aire en la atmósfera [14]

1.1.1.- Mecanismos del movimiento del viento

Uno de los modelos más simples que permite describir el mecanismo del movimiento del viento atmosférico considera cuatro fuerzas atmosféricas [13]. Estas fuerzas son: fuerzas de presión, fuerza de coriolis causada por el movimiento de rotación de la tierra, fuerzas inerciales debidas al movimiento circular a gran escala y las fuerzas de fricción producidas por la superficie de la tierra.

La *fuerza de presión* en el aire (por unidad de masa), F_p está dada por:

$$F_p = -\frac{1}{\rho} \frac{\Delta p}{\Delta x} \quad (1-1)$$

Donde ρ es la densidad del aire y $\Delta p/\Delta x$ es el gradiente de presión normal a las líneas de presión constante o isobaras.

La *fuerza de Coriolis* (por unidad de masa), F_c se expresa como:

$$F_c = fU \quad (1-2)$$

Donde U es la velocidad del viento y f es el parámetro de Coriolis [$f = 2\omega \sin(\phi)$] donde ϕ representa la latitud y ω la rotación angular de la tierra. Por lo tanto, la magnitud de la fuerza de Coriolis depende de la velocidad de viento. La fuerza de Coriolis siempre es perpendicular a la dirección del eje de rotación de la tierra y a la dirección del movimiento del aire visto desde el sistema en rotación.

El resultado de la fuerza de presión y la fuerza de Coriolis se denomina *viento geostrófico*, el cual tiende a ser paralelo a las líneas isobaras como se puede ver en la Figura 1-2.

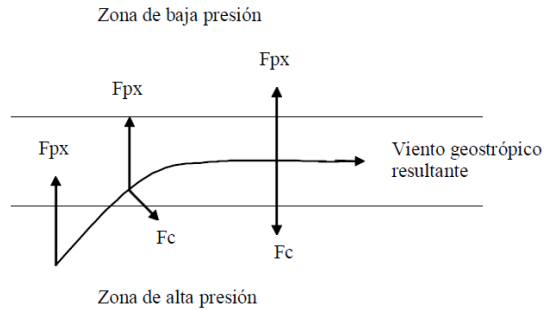


Figura 1-2. Generación de viento geostrópico debido al balance de la fuerza de presión y fuerza de Coriolis [21]

La magnitud del viento geostrópico, U_g es una función del balance de fuerzas y está dada por:

$$U_g = -\frac{1}{f\rho} \frac{\Delta p}{\Delta x} \quad (1-3)$$

Este es un caso idealizado, dada la presencia de áreas de alta y baja presión las líneas isobaras se curvan. Esto impone una nueva fuerza en el viento, una fuerza centrífuga. El viento resultante se le denomina viento gradiente U_{gr} .

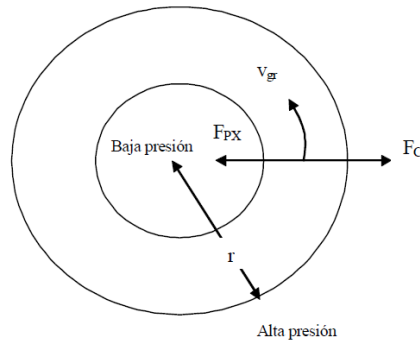


Figura 1-3. Viento gradiente [21]

El *viento gradiente* es también paralelo a las líneas isobaras y es el resultado del balance de las fuerzas:

$$\frac{U_{gr}^2}{R} = fU_{gr} - \frac{1}{\rho} \frac{\Delta p}{\Delta x} \quad (1-4)$$

Donde R es el radio de la curvatura de la trayectoria de la partícula de aire y

$$U_{gr} = U_g - \frac{U_{gr}^2}{fR} \quad (1-5)$$

Este patrón de circulación general descrito por las cuatro fuerzas mencionadas anteriormente representa un modelo de circulación en una superficie esférica lisa. En realidad, la superficie de la tierra varía considerablemente con grandes extensiones de océanos y masas de tierra. Esta diferencia en la superficie puede afectar el flujo de aire debido a la variación en los cambios de presión, la absorción de la radiación solar y la cantidad de humedad disponible.

Aunque los vientos globales son muy importantes en la determinación de los vientos dominantes de un área determinada, las condiciones climáticas locales pueden influir en la dirección de vientos más comunes. A altitudes menores de 100 metros sobre la superficie terrestre, los vientos están muy influenciados por las características de dicha superficie y por lo tanto el viento es frenado por la rugosidad de la superficie de la tierra y por los obstáculos.

Los vientos locales siempre se superponen en los sistemas eólicos a gran escala, esto es, la dirección del viento es influenciada por la suma de los efectos globales y locales. Cuando los vientos a gran escala son suaves, los vientos locales pueden dominar los regímenes de viento. Los principales efectos locales son los siguientes [14]:

1. Brisas marinas: Durante el día la tierra se calienta más rápidamente que el mar por efecto del sol. El aire sube, circula hacia el mar, y crea una depresión a nivel del suelo que atrae al aire frío del mar. Esto es lo que se llama brisa marina. Durante la noche los vientos soplan en sentido contrario.

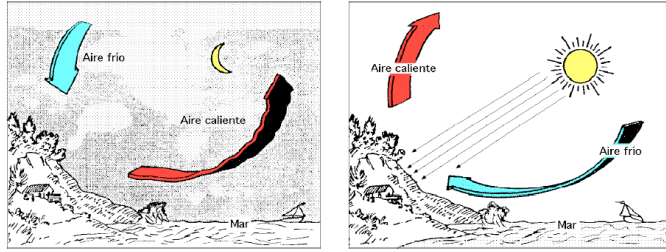


Figura 1-4. Efecto brisa marina [14]

2. Vientos de montaña: las regiones montañosas muestran modelos de clima muy interesantes. Un ejemplo es el viento del valle que se origina en las laderas que dan al sur (o en las que dan al norte en el hemisferio sur). Cuando las laderas y el aire próximo a ellas están muy calientes la densidad del aire disminuye, y el aire asciende hasta la cima siguiendo la superficie de la ladera. Durante la noche la dirección del viento se invierte, convirtiéndose en un viento que fluye ladera abajo.

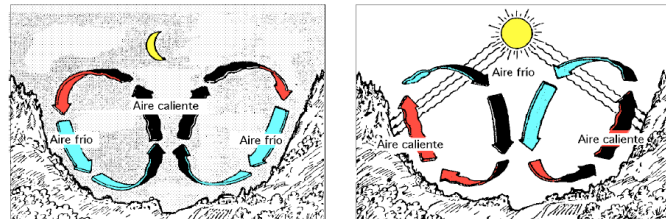


Figura 1-5. Efecto valle- montaña [14]

3. Efecto túnel: si se toma un camino con un paso estrecho entre montañas se observará que el aire al pasar a través del estrecho se comprime en la parte de la montaña que está expuesta al viento, y su velocidad crece considerablemente entre los obstáculos del viento. Esto es lo que se conoce como efecto túnel.

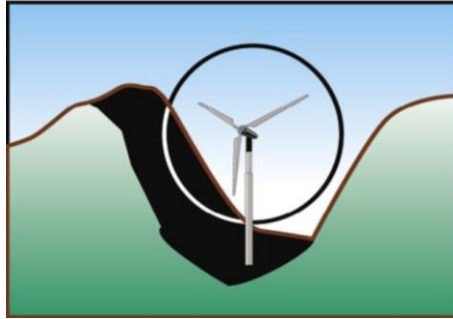


Figura 1-6. Efecto túnel [14]

4. Efecto de la colina: En las colinas siempre se aprecian velocidades de viento superiores a las de las áreas circundantes. Tal como se observa en la Figura 1-7, el viento empieza a inclinarse algún tiempo antes de alcanzar la colina y de esta manera aumenta su velocidad al llegar a la cima. Es importante resaltar que si la colina es escarpada o tiene una superficie accidentada, puede haber una cantidad de turbulencia significativa, que puede anular la ventaja que supone tener velocidades de viento mayores.

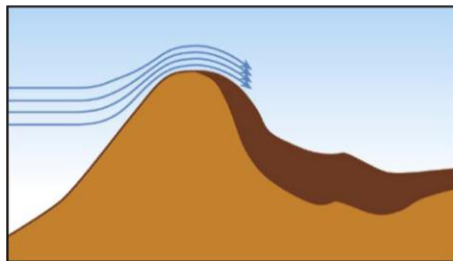


Figura 1-7. Efecto colina [14]

De este modo, el viento es considerado como recurso energético y desde el punto de vista de su disponibilidad como suministro, es importante conocer los fenómenos tanto globales como locales ya que estos originan su movimiento.

1.2 Principio físico de la conversión de la energía del viento.

Una vez que se conoce como se genera el viento, se debe determinar cuanta potencia se puede extraer de él. Partiendo de la ecuación de la energía cinética se considera lo siguiente:

Considérese un flujo laminar perpendicular a la sección transversal de un cilindro como se muestra en la Figura 1-8, moviéndose a una velocidad U con una masa de aire m . La energía cinética para este flujo laminar está dada por la expresión:

$$E_c = \frac{1}{2} m U^2 \quad (1-6)$$

Donde m es la masa de aire en movimiento y U la velocidad del viento. Por otro lado, la razón del flujo de masa está dado por:

$$\frac{dm}{dt} = \rho A U \quad (1-7)$$

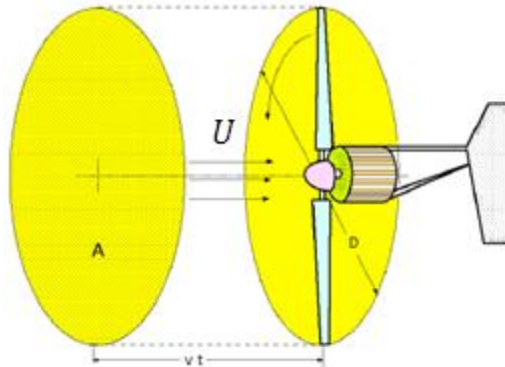


Figura 1-8. Flujo de aire a través de un cilindro [9]

La potencia, P_w , es igual a la energía cinética por unidad de tiempo. Para este flujo está representada de la siguiente manera:

$$P_w = \frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} U^2 \quad (1-8)$$

Por tanto la potencia que puede generar el viento esta principalmente influenciada por su velocidad como se puede observar en la siguiente ecuación.

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A U^3 \quad (1-9)$$

Finalmente, la potencia transmitida al rotor eólico, corresponde a un porcentaje de la potencia del viento, y depende de diversos factores constructivos del mismo. Estos factores influyen en el denominado coeficiente de potencia C_p , definido como la relación entre la potencia extraída por el rotor eólico y la potencia del viento.

1.3 Transformación de energía. Rendimiento

El rendimiento de un aerogenerador está en función de las pérdidas de energía en sus diferentes componentes. A continuación se describen cada una de ellas.

El límite de Betz establece que cualquier sistema que aproveche el viento puede transformar como máximo el 59.3% de la potencia del viento incidente. La potencia del viento que incide sobre un rotor eólico está dada por la ecuación (1-9).

El factor que relaciona la potencia mecánica del eje de baja velocidad, $P_{m,b}$ y la potencia del viento, P_w , se denomina coeficiente de potencia mecánico, $C_{P,m}$. El coeficiente de potencia mecánico se interpreta como el rendimiento del rotor eólico, el cual depende fundamentalmente de dos parámetros, uno es el ángulo de paso de pala, β y el coeficiente de velocidad específica, λ , que es la relación entre la velocidad lineal en la punta de la pala y la velocidad de viento incidente.

$$P_{m,b} = P_w \cdot C_{P.m}(\beta, \lambda) \quad (1-10)$$

Esta potencia mecánica, $P_{m,b}$, se transmite al eje de alta velocidad a través del tren de potencia que proporciona al eje del generador eléctrico una potencia $P_{m,a}$. Las pérdidas de potencia que se producen en el sistema mecánico se deben principalmente a dos factores: el primero es el rozamiento existente en los cojinetes y los cierres de contacto del eje, η_{m1} y el segundo factor es el rendimiento de la caja multiplicadora, η_{m2} . El producto de estos dos rendimientos se considera como rendimiento mecánico, $\eta_m = \eta_{m1} \cdot \eta_{m2}$. Por tanto, la potencia mecánica se expresa como:

$$P_{m,a} = P_{m,b} \cdot \eta_m = P_w \cdot C_{P.m}(\beta, \lambda) \cdot \eta_m \quad (1-11)$$

Por último, el generador eléctrico, los convertidores electrónicos, los cables de salida del aerogenerador y el transformador de conexión a red convierten la potencia mecánica disponible en el eje del generador, $P_{m,a}$ en potencia eléctrica, P_e . En todos estos componentes se producen pérdidas de energía que se han de contabilizar en el momento de calcular el rendimiento eléctrico del sistema, η_e . De esta manera la potencia eléctrica final se expresa como:

$$P_e = P_{m,a} \cdot \eta_e = P_w \cdot C_{P.m}(\beta, \lambda) \cdot \eta_m \cdot \eta_e \quad (1-12)$$

El producto del coeficiente de potencia mecánica por el rendimiento mecánico y eléctrico se denomina coeficiente de potencia eléctrica, $C_{P,e}$.

$$C_{P,e} = C_{P.m}(\beta, \lambda) \cdot \eta_m \cdot \eta_e \quad (1-13)$$

Existen otras pérdidas que no se consideran normalmente, como son las que tienen lugar en los motores de orientación de la góndola, en la alimentación del sistema hidráulico, en el alumbrado del interior de la góndola, en la alimentación de los sistemas de supervisión y control, etc.

Tomando en cuenta el coeficiente de potencia eléctrica, $C_{P,e}$, la potencia eléctrica de un aerogenerador se expresa de la siguiente manera:

$$P_e = \frac{1}{2} \rho A U^3 \cdot C_{P,e} \quad (1-104)$$

La evaluación de las pérdidas tiene mayor importancia principalmente cuando el aerogenerador funciona a carga parcial, esto es, cuando la potencia que produce el aerogenerador es menor a la potencia eléctrica asignada. En este caso, el sistema de control del aerogenerador permite al sistema funcionar en condiciones tales que el rendimiento global de la instalación sea el mayor posible.

En la Figura 1-9 se representan los rendimientos mecánicos y eléctricos, así como el flujo de potencia a plena carga en un aerogenerador de 1MW. Estos rendimientos son estimados, aunque se considera que el orden de magnitud se ajusta fielmente a los valores encontrados en la literatura [3].

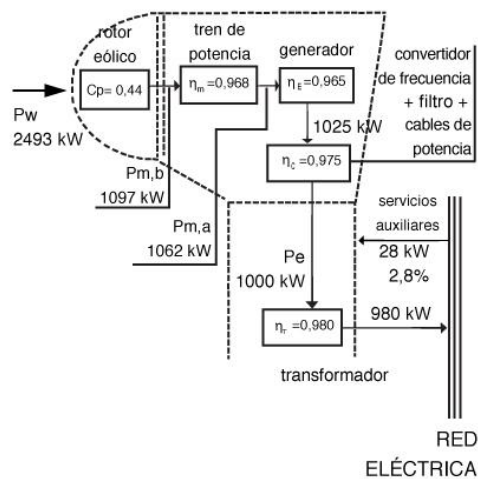


Figura 1-9. Rendimiento y flujo de potencia a plena carga de un aerogenerador de 1MW. Los rendimientos incluidos son estimados [3].

1.4 Clasificaciones de los aerogeneradores.

Los aerogeneradores son sistemas capaces de transformar, la energía cinética del viento en energía mecánica a través del rotor eólico. Esta energía mecánica se aprovecha de dos maneras, de manera directa en instalaciones para aplicaciones de bombeo en zonas aisladas, o mediante sistemas de producción de energía eléctrica.

Una primera clasificación de los sistemas producción de energía eólica es dependiendo de la potencia que estos pueden generar o el tamaño del rotor [3]

- Aerogeneradores de pequeña potencia (<100kW o menos de 7 metros de diámetro del rotor).
- Aerogeneradores de media potencia (algunos cientos de kilovatios o con un diámetro de rotor entre 25 m y 50 m).
- Aerogeneradores de alta potencia (generan en el orden de megavatios o tienen diámetros de rotor mayor a 50 m).

Una sub-clasificación o segunda clasificación de los aerogeneradores es según el tipo de rotor eólico y la disposición de su eje de giro. De esta manera los aerogeneradores se sub-clasifican en aerogeneradores con rotor de eje vertical y aerogeneradores con rotor de eje horizontal.

Aerogeneradores con rotor de eje vertical. Tienen la ventaja sobre los de eje horizontal de tener el tren de potencia, el generador eléctrico y los sistemas de control al nivel del suelo, lo que facilita su instalación y mantenimiento, además de no tener que disponer de un sistema de orientación activo para captar la energía contenida en el viento. Los aerogeneradores más conocidos con rotores de eje vertical son los rotores tipo Darrieus y tipo Savonius.



Figura 1-10. Aerogenerador vertical Darrieus (izquierda) y Savonius (derecha) [24].

Aerogeneradores con rotor de eje horizontal. Los aerogeneradores más comunes son los de eje horizontal y estos se caracterizan por hacer girar sus palas en dirección perpendicular a la velocidad de viento incidente. Estos tipos de aerogeneradores se pueden clasificar nuevamente en turbinas eólicas con rotor multipala y en turbinas eólicas con rotor tipo hélice.

- Turbinas eólicas con rotor multipala (lentos).

Este tipo de turbinas eólicas se caracterizan por tener un número de palas de entre 6 a 24 y por tanto una solidez alta. También presentan un par de arranque elevado y una velocidad de giro baja. La velocidad lineal de la punta de la pala, en condiciones de diseño, es del mismo orden que la velocidad del viento incidente. Su principal aplicación es para el bombeo de agua y no se utiliza para la generación de energía eléctrica por su régimen de giro bajo.

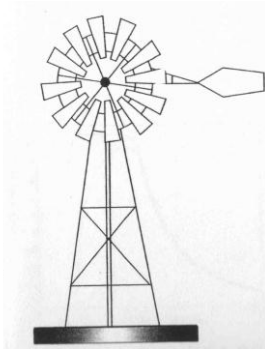


Figura 1-11. Turbina eólica horizontal con rotor multipala americano [3].

- Turbinas eólicas con rotor tipo hélice (rápidos).

La velocidad lineal de la punta de la pala es de 6 a 14 veces más rápido que la velocidad del viento incidente en condiciones de diseño. Esta propiedad hace que las turbinas eólicas rápidas sean adecuadas para la generación de energía eléctrica.

Dentro de las turbinas eólicas rápidas los más utilizados son los aerogeneradores con rotor de tres palas, esto debido a su mejor estabilidad estructural y aerodinámica, menor emisión de ruido y mayor rendimiento frente a los rotores de una o dos palas.

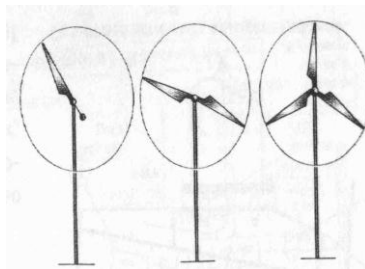


Figura 1-12. Aerogenerador con rotor de eje horizontal tipo hélice (monopala, bipala y tripala) [3].

Otra clasificación adicional de los aerogeneradores con rotor de eje horizontal tipo hélice es su disposición (orientación) frente a la velocidad de viento incidente. De esta manera los aerogeneradores se diseñan para que trabajen en configuración de *barlovento* o *sotavento* (Figura 1-14).

Las ventajas de los aerogeneradores de eje horizontal respecto de los de eje vertical son:

- *Mayor rendimiento.*
- *Mayor velocidad de giro (multiplicadores más sencillos).*
- *Menor superficie de pala a igualdad de área barrida.*
- *Se pueden instalar a mayor altura, donde la velocidad del viento es más intensa.*

1.4.1 Componentes básicos de un aerogenerador.

Como se observa en el apartado anterior, existen una gran variedad de aerogeneradores. Sin embargo, la tecnología actual ha evolucionado hacia aerogeneradores con rotor de eje horizontal, tripala a barlovento y con torre tubular.

A continuación se describen los componentes básicos de este tipo de aerogeneradores.

El *rotor eólico* es un conjunto de componentes que giran afuera de la góndola. Estos componentes son las palas, el buje, la nariz y los mecanismos de cambio de paso de pala (en algunos casos). El rotor es uno de los componentes principales en un aerogenerador, ya que es el encargado de convertir la energía cinética del viento en energía mecánica en el eje de rotación.

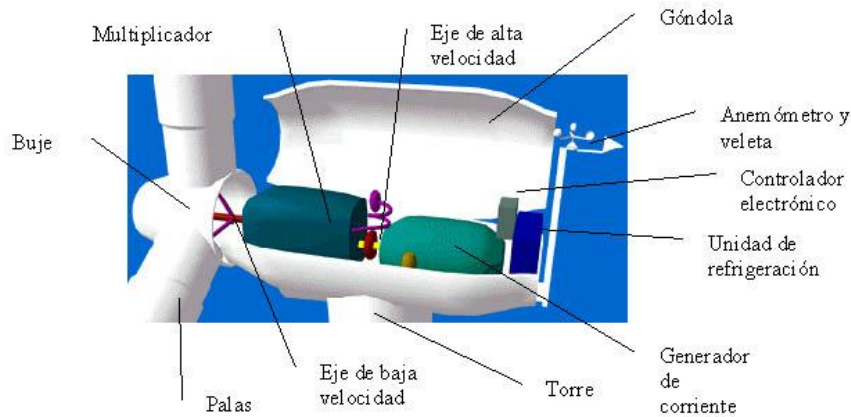


Figura 1-13. Componentes de un aerogenerador.

La *caja multiplicadora* como elemento del tren de potencia aparece en la mayoría de los aerogeneradores modernos, esta consiste en un eje de baja potencia del lado del rotor, una caja de engranes y un eje de alta velocidad del lado del generador. La necesidad de la caja multiplicadora se justifica por la diferencia entre el régimen de giro del rotor eólico y el que requiere un generador eléctrico. Existen dos tipos de cajas multiplicadoras: de ejes paralelos y planetario.

El rendimiento mecánico de las cajas multiplicadoras, depende de: el número y tipo de etapas multiplicadoras, la potencia mecánica transmitida y la velocidad de giro. Debido a la construcción de generadores eléctricos de velocidad nominal baja, se han construido aerogeneradores que ya no necesitan la caja multiplicadora. En este caso, el rotor se acopla directamente al generador eléctrico.

El *generador eléctrico* es el elemento central del sistema eléctrico de los aerogeneradores y el componente a partir del cual se dimensionan los restantes elementos como son el rotor, sistemas de control, etc. [9]. Existen dos tipos básicos de generadores: los generadores asíncronos o de inducción y los generadores síncronos.

En la actualidad se están utilizando generadores síncronos de imanes permanentes para la fabricación de aerogeneradores de baja potencia. Una de las ventajas de este tipo de generador es que se pueden utilizar acoplados directamente al rotor y de esta manera eliminar el uso de la caja multiplicadora.

El *sistema de orientación* es el encargado de mantener el rotor en un plano perpendicular a la dirección del viento incidente con el fin de extraer de él la máxima energía.

Como se menciona anteriormente, los aerogeneradores se pueden clasificar según su orientación, los que trabajan con configuración a barlovento necesitan un sistema de orientación activo ya que el viento primeramente incide sobre el rotor y posteriormente sobre la torre. Por otro lado, los aerogeneradores que trabajan con configuración a sotavento requieren de un sistema de orientación pasivo que se basa en inclinar ligeramente las palas con el objetivo de que en el momento que el rotor no esté orientado, las palas que se encuentran más a favor del viento incidente reciban un empuje aerodinámico que tiende a variar la orientación del rotor hacia la posición de equilibrio.

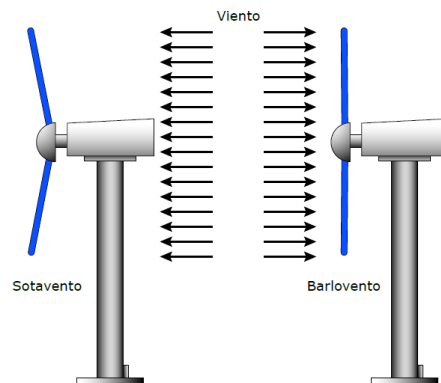


Figura 1-14. Orientación a barlovento y sotavento [14].

En los aerogeneradores de baja potencia (menos de 100kW) orientados a barlovento el sistema de orientación más simple es una cola o veleta.

La *torre* es uno de los componentes principales en los aerogeneradores de eje horizontal, ya que es la encargada de sostener al rotor y la góndola a alturas considerables. La altura de las torres es normalmente de 1 a 1.5 veces el diámetro del rotor y considerando que en la actualidad existen rotores de más de 100 m, es importante su diseño.

Tipos de torres:

- Torre de celosía.
- Torre tubular de acero.
- Torre tubular de hormigón.

La torre debe poseer una rigidez suficiente para soportar las cargas de empuje transmitidas por el rotor.

Estructura soporte, chasis o góndola es una estructura metálica donde se monta el tren de potencia, el generador eléctrico, los sistema de medición y control, entre otros componentes dependiendo del tipo de aerogenerador. La góndola recibe las cargas del rotor eólico por medio del tren de potencia y las transmite a la torre a través del sistema de orientación.

Otro componente de los aerogeneradores es el *sistema de control*. Los aerogeneradores de alta potencia cuentan con varios ordenadores que continuamente supervisan las condiciones de funcionamiento por medio de sensores, posteriormente procesan, visualizan y almacenan estas señales. Otra función del sistema es controlar un gran número de interruptores, bombas hidráulicas, válvulas y motores dentro de la turbina [4].

Capítulo 2. Sistema de Control.

Un sistema de control está definido como un conjunto de componentes que pueden regular su propia conducta o la de otro sistema con el fin de lograr un funcionamiento predeterminado, de modo que se reduzcan las probabilidades de fallos y se obtengan los resultados buscados [26].

Los objetivos fundamentales del sistema de control de un aerogenerador son los siguientes:

- Obtener un funcionamiento automático y fiable del aerogenerador.
- Conseguir que la turbina funcione en consonancia con el viento (orientación, control de potencia, etc.).
- Decidir la conexión/desconexión del generador y realizar correctamente los arranques y paradas del aerogenerador.
- Proteger al sistema (frente a sobrevelocidades, vibraciones, sobrecalentamientos, enrollamientos de los cables de interconexión, embalamientos y otros imprevistos).
- Maximizar el rendimiento del sistema.
- Señalizar posibles averías o funcionamientos incorrectos disminuyendo los costos de mantenimiento y los tiempos de reparación.
- Aumentar la vida útil del aerogenerador (minimizando las cargas imprevistas que se puedan presentar).
- Controlar la orientación del rotor con respecto a la dirección del viento.
- Controlar los procesos de paro forzado.
- Controlar los elementos auxiliares dedicados a mantener las mejores condiciones de operación normal.
- Ser la interfaz local entre el operador y la máquina.
- Adquirir y procesar los datos del comportamiento operacional del aerogenerador.

- Mantener la comunicación con los centros de supervisión en centrales eoloelectricas (transmisión de datos).

En la Figura 2-1 se muestra el diagrama en bloques básico del sistema de control de un aerogenerador.

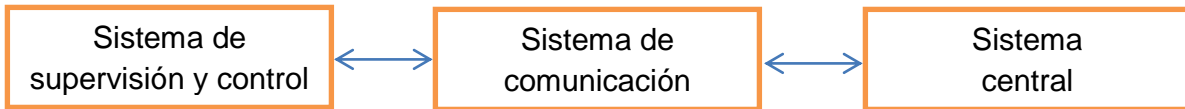


Figura 2-1. Diagrama en bloques del sistema de control de un aerogenerador.

El sistema de control de aerogeneradores a veces se denomina SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*).

Para que el sistema de control logre sus objetivos, se miden y procesan las variables de control, entre las que se encuentran:

- Velocidad y dirección del viento.
- Velocidad angular del rotor eólico.
- Temperaturas.
- Presión.
- Ángulo de orientación.
- Vibraciones.
- Estados operativos.
- Parámetros eléctricos.
- Eventos.

Cada sistema de control está diseñado en forma específica para el modelo de aerogenerador al que se aplica, es decir, cada sistema cuenta con sus propios algoritmos y secuencias lógicas. Los sistemas de control tienen características comunes, pero pueden llegar a ser muy diferentes de un modelo de aerogenerador a otro.

La efectividad y fiabilidad de los sistemas de control tiene un impacto relevante en cuanto al desempeño de un aerogenerador. Es decir, no puede existir un buen aerogenerador si su sistema de control es deficiente [1].

En la siguiente sección se describe cada bloque del sistema de control.

2.1 Sistema de supervisión y control.

El sistema de supervisión y control conmuta entre los estados de operación del aerogenerador (producción, desconexión por bajo viento, etc.), monitorea las variables que intervienen en su operación.

Salvo que se produzca una emergencia, el sistema de supervisión se caracteriza por acciones a medio o largo plazo debido a cambios en las condiciones de operación.

Este sistema se encarga de recoger información de señales de campo, como medidas analógicas proveniente de los sensores, alarmas e información de estado del aerogenerador. En ocasiones almacenan temporalmente la información hasta que la envía al sistema central. Además, el sistema de supervisión y control es el encargado de llevar a cabo las órdenes enviadas desde el sistema central, como la apertura y cierre de válvulas e interruptores, o el envío de valores analógicos de referencia [3].

En la Figura 2-2 se presenta el diagrama en bloques básico del sistema de supervisión y control:

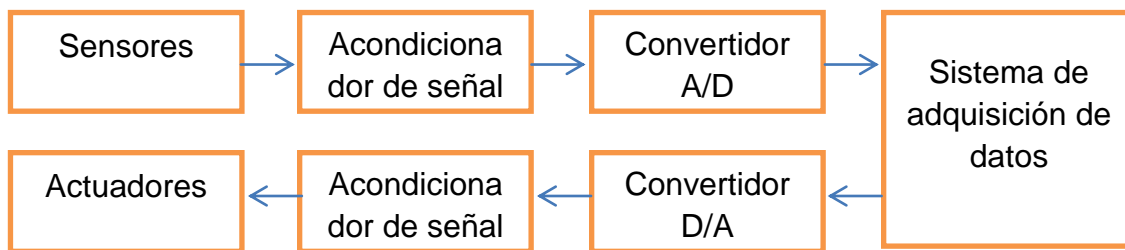


Figura 2-2. Diagrama en bloques del sistema de supervisión y control

En este apartado se describen los principales componentes que conforman el sistema de supervisión y control de un aerogenerador de baja potencia,

2.1.1 Sensores y actuadores

Un *actuador* es un dispositivo capaz de transformar energía hidráulica, neumática o eléctrica en la activación de un proceso con la finalidad de generar un efecto sobre un proceso automatizado. Este recibe la orden de un regulador o controlador y en función a ella genera la orden para activar un elemento final de control como, por ejemplo, una válvula.

Existen varios tipos de actuadores como son:

- Electrónicos.
- Hidráulicos.
- Neumáticos.
- Eléctricos.

Un *sensor* es un dispositivo que, a partir de la energía del medio donde se mide, da una señal de salida transducible que es función de la variable medida [5].

Puede decirse también que es un dispositivo que aprovecha una de sus propiedades con el fin de adaptar la señal que mide para que la pueda interpretar otro dispositivo [15].

Es importante señalar las características de un sensor debido a que, en función de estas características y de los parámetros de las variables a monitorear en el aerogenerador, es como se seleccionan los sensores del sistema de supervisión y control.

Entre las características técnicas de un sensor destacan las siguientes:

- Rango de medida: dominio en la magnitud medida en el que puede aplicarse el sensor.
- Resolución: mínima variación de la magnitud de entrada que puede apreciarse a la salida.
- Sensibilidad: relación entre la variación de la magnitud de salida y la variación de la magnitud de entrada.
- Precisión: es el error de medida máximo esperado.
- Repetitividad: error esperado al repetir varias veces la misma medida.
- *Offset* o desviación de cero: valor de la variable de salida cuando la variable de entrada es nula. Si el rango de medida no llega a valores nulos de la variable de entrada, habitualmente se establece otro punto de referencia para definir el *offset*.
- Rapidez de respuesta: puede ser un tiempo fijo o depender de cuánto varíe la magnitud a medir. Depende de la capacidad del sistema para seguir las variaciones de la magnitud de entrada.
- Derivas: son otras magnitudes, aparte de la medida como magnitud de entrada, que influyen en la variable de salida. Por ejemplo, pueden ser condiciones ambientales, como la humedad, la temperatura u otras como el envejecimiento (oxidación, desgaste, etc.) del sensor.

Los sistemas de supervisión sensan variable de campo con la finalidad de monitorear el aerogenerador, entre las que se encuentran:

- Velocidad angular del rotor eólico.
- Voltaje
- Corriente.
- Temperatura.
- Vibración.

Voltaje.

Como se ha mencionado, un aerogenerador convierte la energía cinética del viento en energía eléctrica, que finalmente es la que se utiliza para diferentes tareas (iluminación, bombeo de agua, etc.). Cuando se desea conocer cuánta potencia genera el aerogenerador se miden dos variables, voltaje y corriente.

Para medir el voltaje existen diferentes formas, siendo las tecnologías de más amplio uso las siguientes:

- Los transformadores de tensión de núcleo de hierro.
- Los divisores resistivos o también llamados divisores de voltaje.

Una forma sencilla y eficaz de diseñar un divisor de voltaje es de acuerdo al voltaje máximo que se requiere medir (V_s) y al voltaje máximo que puede leer el sistema receptor de la señal censada (V_2).

El divisor de voltaje está integrado por dos resistencias como se ve en la Figura 2-3; los valores conocidos son V_s y V_2 como se mencionó anteriormente. Para establecer el valor adecuado de R_1 y R_2 del divisor primero se determina el valor de R_2 con lo que obtendremos la corriente que circula por el divisor, I , por medio de la ley de Ohm.

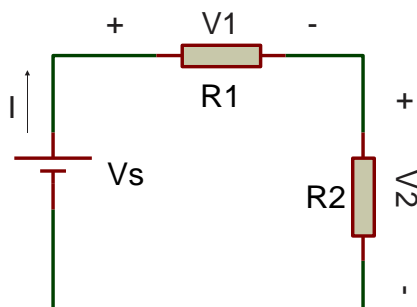


Figura 2-3. Divisor de voltaje.

$$I = \frac{V2}{R2} \quad (2-1)$$

Luego se despeja $V1$ de la siguiente ecuación.

$$V_s = V1 + V2 \quad (2-2)$$

Y se obtiene.

$$V1 = V_s - V2 \quad (2-3)$$

Por ley de Ohm nuevamente, se calcula el valor de $R1$ como se observa en la siguiente ecuación:

$$R1 = \frac{V1}{I} = \frac{V_s - V2}{I} \quad (2-4)$$

Un punto fundamental en la selección de las resistencias del divisor de voltaje es calcular cuánta potencia consumirá cuando esté el generador eléctrico trabajando a valores nominales, por tanto se deben seleccionar de un valor superior al calculado. Para esto se calcula la potencia con la ecuación siguiente:

$$P = V * I \quad (2-5)$$

Corriente.

La corriente es una variable que se requiere conocer para determinar cuánta potencia genera el aerogenerador, debido a esto resulta importante medir esta variable en el sistema de supervisión y control.

Para medir la corriente eléctrica se utilizan diferentes tipos de sensores que atendiendo a su principio de funcionamiento se clasifican en:

- Inductivos: Transformadores de corriente. El cable a medir pasa por medio de un núcleo magnético que tiene un bobinado secundario que proporciona una tensión proporcional a la corriente que circula por el cable.
- Resistivos: Shunt. Una resistencia provoca una caída de tensión proporcional a la corriente que circula por dicha resistencia Shunt.
- Magnéticos (Efecto Hall): El sensor mide el campo magnético de un núcleo, generado por la corriente que circula por el cable a medir, que bobina al núcleo.
- Bobina Rogowsky: Miden los cambios de campo magnético alrededor de un hilo por el que circula una corriente para producir una señal de voltaje que es proporcional a la derivada de la corriente (di/dt) [15].

El principio de funcionamiento de los sensores de efecto Hall para la medición de corriente, se basa en el fenómeno por el cual una corriente eléctrica atraviesa un material conductor mientras se aplica un campo magnético que forma un ángulo recto con la corriente, esto genera un voltaje perpendicular a ambos, corriente y campo, como se puede ver en la Figura 2-4 llamado voltaje Hall. Un sensor de efecto Hall está compuesto de una hoja delgada de un material conductor con conexiones de salida perpendiculares a la dirección del flujo de la corriente.

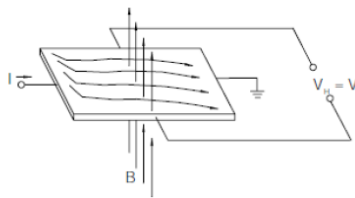


Figura 2-4. Principio de funcionamiento de efecto Hall, campo magnético presente [22].

Velocidad angular.

El rotor eólico comúnmente está conectado directamente al rotor del generador eléctrico en los aerogeneradores de baja potencia, por lo tanto, el generador

eléctrico genera potencia en función de la velocidad angular del rotor eólico. Las revoluciones por minuto “rpm” son una forma de expresar la velocidad angular.

Un aerogenerador tiene una velocidad de arranque y otra de desconexión, por esta razón es importante medir la velocidad angular con la finalidad de que el generador no exceda la velocidad de desconexión y se ponga en peligro el mismo y los seres vivos que se encuentren a su alrededor.

Para la medición de la velocidad de giro del rotor del generador se usan sensores que trabajan bajo los siguientes principios de operación:

- Electromecánicos: Lo integran los finales de carrera o microrruptores. Se sitúan en puntos estratégicos a detectar, en sistemas industriales y máquinas en general. Conmutan directamente cualquier señal eléctrica. Tienen una vida limitada y debido a su tamaño solo pueden detectar posiciones determinadas.
- Magnéticos: Lo integran los Detectores de Proximidad Magnéticos, que pueden ser los de Efecto Hall y los Resistivos, típicos en aplicaciones industriales.
- Inductivos: Lo integran los Detectores de Proximidad Inductivos, los Sincros y Resolvers, los RVDT (Rotatory Variable Differential Transformer) y LVDT (Lineal Variable Differential Transformer).
- Potenciométricos: Lo integran los potenciómetros lineales o circulares.
- Ópticos: Lo integran las células fotoeléctricas y los encoders [15].

El principio de funcionamiento de un sensor de efecto Hall aplicado a la medición de la velocidad angular es el siguiente. Cuando se tiene un campo magnético que atraviesa perpendicularmente una corriente eléctrica, este genera un voltaje perpendicular a ambos. En el momento en el que se quita el campo magnético, el flujo de corriente se vuelve uniforme y la diferencia de potencial es 0, como se puede ver en la Figura 2-5.

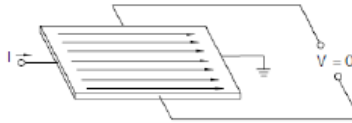


Figura 2-5. Principio de efecto Hall, sin campo magnético [22].

Por lo tanto si se coloca un campo magnético (imán) unido al rotor, este gira y constantemente está cortando perpendicularmente al sensor de efecto Hall que produce un voltaje discontinuo muy pequeño, para producir un tren de pulsos. Existen circuitos integrado de efecto Hall que están compuestos del elemento Hall, un amplificador, un schmidt trigger y un transistor los cuales en el momento en que existe la presencia de un campo magnético generan un pulso con la magnitud de la fuente de alimentación como se observa en la Figura 2-6.

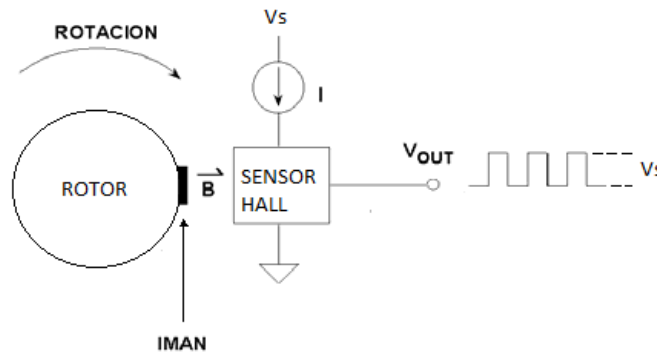


Figura 2-6. Generación de tren de pulso en base a sensor de efecto Hall

Una vez que se obtiene la señal en forma de pulsos con una amplitud del voltaje del nivel de polarización del sensor es posible introducirla al sistema de adquisición de datos y calcular la velocidad angular del rotor del generador eléctrico. Este cálculo se puede realizar de las siguientes maneras:

- Contabilizando el número de pulsos que ocurren en un minuto.
- Calculando la frecuencia entre dos pulsos y multiplicándola por 60.

Temperatura.

Probablemente sea la temperatura el parámetro físico más común que se mide en los sistemas de control; incluso en muchos casos en que el parámetro de interés no es la temperatura, ésta se ha de medir para incluir indirectamente su efecto en la medida deseada [15].

En un aerogenerador de baja potencia es primordial medir la temperatura del generador eléctrico, del rectificador y de los componentes de potencia con la finalidad de evitar daños en estos componentes, además de llevar un registro de la temperatura ambiente.

La selección de los sensores de temperatura se realiza en función de los parámetros permisibles de operación de los componentes mencionados anteriormente.

A continuación se mencionan algunos tipos de sensores de temperatura:

- Termopares: Los termopares utilizan la tensión generada en la unión de dos metales en contacto térmico, debido a sus distintos comportamientos eléctricos.
- Resistivos: Lo constituyen las RTD (Resistance Temperature Detector) o PT100 basadas en la dependencia de la resistividad de un conductor con la temperatura, y están caracterizadas por un coeficiente de resistividad positivo PTC (Positive Termal Coefficient). También lo son las NTC (Negative Termal Coefficient), que se llaman termistores y están caracterizadas por un coeficiente de temperatura negativo.
- Semiconductores: Se basan en la variación de la conducción de una unión p-n polarizada directamente. Existen circuitos integrados que trabajan bajo este principio de funcionamiento y tienen alta precisión en sus mediciones [15].

Vibración.

La vibración es un intercambio de energía cinética en cuerpos con rigidez y masa finitas, el cual surge de una entrada de energía dependiente del tiempo. Este intercambio de energía puede ser producido por:

- Desequilibrio en máquinas rotatorias.
- Entrada de energía acústica.
- Circulación de fluidos o masas.
- Energía electromagnética.

La medición de la vibración se define como el estudio de las oscilaciones mecánicas de un sistema dinámico, además deben ser hechas con la finalidad de producir los datos necesarios para realizar significativamente conclusiones del sistema bajo prueba. Estos datos pueden ser usados para minimizar o eliminar la vibración, y por tanto eliminar el ruido resultante. En algunas aplicaciones, el ruido no es el parámetro a controlar, sino la calidad del producto obtenido por el sistema [16].

El objetivo fundamental de medir las vibraciones en un aerogenerador es evitar que este entre en resonancia debido a altas vibraciones y se destruya, así como también conocer el comportamiento estructural del aerogenerador bajo ciertas condiciones de operación (arranque de operación, detención de emergencia, diferentes cargas estructurales provocadas por el viento, etc.).

Para medir las vibraciones a continuación se muestran los diferentes tipos de sensores que se usan actualmente.

- Sensores de aceleración.
 - Acelerómetros piezoresistivos.
 - Acelerómetros piezoeléctricos.
- Sensores de desplazamiento.

- Corriente *Eddy*.
- Capacitivos.
- Sensores de velocidad.
 - Vibrómetros láser.

2.1.2 Acondicionamiento de Señal.

Los acondicionadores de señal son elementos del sistema de supervisión y control que, a partir de las señales de los sensores, ofrecen una señal apta para ser procesada, registrada, almacenada o transmitida hacia el sistema receptor. Consisten normalmente en circuitos electrónicos que ofrecen, entre otras funciones, las siguientes: filtrado, amplificación, adaptación de impedancia y modulación o demodulación.

Entre los sistemas receptores más comunes está el convertidor analógico digital (CAD por sus siglas en español o A/D). La conversión analógica digital también es conocida por el acrónimo inglés ADC (*analogue to digital converter*).

La digitalización o conversión analógica-digital (CAD) consiste básicamente en realizar de forma periódica medidas de la amplitud de una señal (por ejemplo, la que proviene del acondicionador de señal del sensor de temperatura), redondear sus valores a un conjunto finito de niveles pre-establecidos de voltaje (conocidos como niveles de cuantificación) y registrarlos como números enteros en la memoria.

En esta definición están presentes los cuatro procesos que intervienen en la conversión analógica-digital:

1. Muestreo: el muestreo (en inglés, *sampling*) consiste en tomar muestras periódicas de la amplitud de onda. La velocidad con que se toma esta muestra, es decir, el número de muestras por segundo, es lo que se conoce como frecuencia de muestreo.

2. Retención (en inglés, *hold*): las muestras tomadas han de ser retenidas (retención) por un circuito de retención (hold), el tiempo suficiente para permitir evaluar su nivel (cuantificación). Desde el punto de vista matemático este proceso no se contempla, ya que se trata de un recurso técnico debido a limitaciones prácticas, y carece, por tanto, de modelo matemático.
3. Cuantificación: en el proceso de cuantificación se mide el nivel de voltaje de cada una de las muestras. Consiste en asignar un margen de valor de una señal analizada a un único nivel de salida. Incluso en su versión ideal, añade, como resultado, una señal indeseada a la señal de entrada: el ruido de cuantificación.
4. Codificación: la codificación consiste en traducir los valores obtenidos durante la cuantificación al código binario. Por lo tanto, cada número del código binario representa una muestra de la señal analógica, el cual está definido por la resolución del dispositivo a utilizar, dicha resolución va de los 8 a los 16 bits. Hay que tener presente que el código binario es el más utilizado, pero también existen otros tipos de códigos que también son utilizados. Una vez convertida la señal analógica a digital se puede enviar a una computadora para ser procesada, desplegada, transmitida o adquirida.

2.1.2.1. Amplificador operacional.

Entre los acondicionadores de señales más utilizados está el amplificador operacional. El amplificador operacional (comúnmente abreviado A.O., op-amp u OPAM) es un circuito electrónico que cuenta con dos entradas y una salida. La salida es la diferencia entre las dos entradas multiplicadas por un factor llamado ganancia (G). La ecuación (2-6) representa a un A.O.

$$V_{out} = G(V_+ - V_-) \quad (2-6)$$

El A.O. ideal tiene una ganancia infinita, una impedancia de entrada infinita, un ancho de banda también infinito, una impedancia de salida nula, un tiempo de respuesta nulo y no tiene ruido. Como la impedancia de entrada es infinita también se dice que las corrientes de entrada son cero [25].

Los A.O. generalmente se utilizan para proporcionar cambios en voltaje (amplitud y/o polaridad) en osciladores, en circuitos de filtro, como buffer, como circuito para eliminar efecto de cargas, como elemento para adaptar impedancia y entre muchas otras aplicaciones. Entre las funciones que puede realizar un A.O. están las de sumar, restar, dividir, multiplicar, integrar y derivar señales analógicas.

2.1.3 Sistema de adquisición de datos.

Para tener un control eficaz sobre un proceso determinado, es necesario obtener una serie de datos para posteriormente procesarlos, analizarlos, transmitirlos, almacenarlos y llevar a cabo una presentación clara y eficaz de la evolución de dicho proceso. Generalmente, los datos o variables que se han de captar tienen un carácter analógico, mientras que su tratamiento, almacenamiento y análisis son mucho más eficaces cuando se hace digitalmente.

En las secciones anteriores se explican las series de módulos electrónicos que permiten llevar a cabo una transformación de los datos desde el campo analógico hasta el campo digital, sin que por ello se deban perder aspectos fundamentales para el proceso que se desea controlar.

En la actualidad los equipos que se utilizan para la adquisición de datos son los siguientes:

- En aerogeneradores de media y alta potencia se utilizan uno o varios PLC (Control con Lógica Programable, familiarmente denominado “autómata”). Están compuestos por uno o más microprocesadores que componen la unidad central de proceso, una etapa de memoria donde está el programa de supervisión y control, un dispositivo de visualización y una etapa con entradas/salidas con sus respectivos convertidores, a través de la cual el sistema de control se comunica con los sensores, actuadores y los sistemas que se desean gobernar. Asimismo, se pueden conectar a un equipo de programación, mediante el cual se puede introducir o modificar el programa de control.
- En los aerogeneradores de baja potencia se utilizan microcontroladores (MCU) debido a su bajo costo y sus grandes prestaciones como son: disponen de los bloques esenciales como CPU, memorias de datos y de programa, reloj, periféricos de entrada/salida, convertidores A/D, etc. Existen multitud de fabricantes de microcontroladores Intel, Motorola, Microchip, etc.

Calibración.

Por definición, calibración es el procedimiento de comparación entre lo que indica un instrumento y lo que "debiera indicar" de acuerdo a un patrón de referencia con valor conocido. En relación a la calibración de un sensor, ella es la relación entre la señal de entrada conocida (referencia o estándar) y la señal de salida obtenida por el sensor [23].

La forma común de calibrar un sensor es introduciendo una señal conocida a la entrada y almacenando la señal de salida. Posteriormente se grafican estas dos señales y se obtiene una curva de calibración representativa del sensor, la cual se obtiene por medio de una regresión que puede ser lineal, exponencial, etc.

Un vez que se tienen las curvas de calibración de los sensores que intervienen en el sistema de supervisión y control, estas se introducen en el programa del sistema de adquisición para poder relacionar las señales eléctricas que provienen del sensor con la variable medida.

Estrategia de control.

A través de la experiencia operativa de los sistemas de producción de energía eólica, se han desarrollado técnicas que han reducido considerablemente el número de fallos atribuibles al sistema de control. Sin embargo, éstas aún representan un alto porcentaje de los eventos de paro forzado y/o de las necesidades de mantenimiento correctivo. De ahí la importancia del uso de sensores y actuadores precisos y confiables, así como del establecimiento de una estrategia de control adecuada para la operación del aerogenerador.

La estrategia de control debe diseñarse para proteger a todo el sistema de producción de energía, pero de forma que la instalación de múltiples protecciones, no interfiera en la correcta operación de la máquina haciendo que su funcionamiento sea a veces pesado (continuos arranques y paradas).

Existen múltiples métodos y estrategias de control de aerogeneradores, casi tantos como tipos de aerogeneradores.

2.2 Sistema de comunicación.

La comunicación dentro del sistema de control, se realiza a diferentes niveles.

1. Comunicación entre los sensores y actuadores y el sistema de supervisión y control. Esta comunicación se realiza tradicionalmente con señales analógicas o digitales por medio de cables.

2. Comunicación entre el sistema de supervisión y control y el sistema central. El principal problema suele ser las grandes distancias que separan a estos dos sistemas. Para solucionar este problema se usan redes de fibra óptica, en redes de área local se utilizan protocolos de comunicación seria, y las mejoras en los equipos de transmisión vía radio han permitido su uso en sistemas eólicos.
3. La comunicación entre el sistema central y el operador del aerogenerador o parque eólico. Este normalmente se lleva a cabo a través de un software.

2.3 Sistema central.

El sistema central de un sistema de control, se encarga de enviar los comandos de alto nivel, y de la recolección de datos y el almacenamiento de la información. El sistema central funciona como interfaz entre el sistema de control y el operador. Esta interface es realizada regularmente mediante software para poder realizar las tareas antes mencionadas.

La interfaz de operador incluye las siguientes funcionalidades [3]:

- *Gestión de alarmas.* Normalmente existen unos sistemas de protección remotos que actúan en caso de funcionamiento anómalo. Cuando un equipo de protección entra en funcionamiento, el operador remoto y el sistema de supervisión deben ser informados mediante un sistema de alarmas. El operador debe confirmar que ha recibido la alarma y debe tomar las acciones oportunas para que el aerogenerador vuelva a la situación normal de funcionamiento: además debe existir un registro de alarmas, donde queden reflejadas todas las incidencias ocurridas.
- *Control de visualización.* Generalmente el número de elementos monitoreados en un aerogenerador es demasiado grande como para poderse reflejar en una sola pantalla gráfica. Es por eso, que la interfaz

consta de varias pantallas o ventanas, de tal manera que el usuario pueda cambiar de una a otra con facilidad.

- *Pantallas de estados.* Las pantallas de estado permiten que el operador compruebe los valores de las variables del sistema y le permita verificar que todo funciona según lo previsto. De alguna forma, son rondas de vigilancia electrónicas que realizan periódicamente los operadores.
- *Gráficos de tendencia.* Los operadores del aerogenerador deben recibir información para realizar la toma de decisiones. Esta información debe estar previamente tratada para evitar la sobrecarga informativa del operador. Es más útil presentar en forma gráfica las tendencias de las variables (ej. sube lentamente la señal del sensor de voltaje) que los valores numéricos exactos, ya que los operadores razonan mejor con información cualitativa.
- *Informes.* En los sistemas de control es necesario generar informes con la finalidad de almacenar las señales provenientes de los sensores, el estado del aerogenerador, etc. para posteriormente poder caracterizar el aerogenerador y de esta manera conocer su operación bajo diferentes condiciones de funcionamiento.

Los sistemas de control actuales permiten integrar de forma eficiente todos los subsistemas que intervienen en la correcta operación del aerogenerador, permitiendo además modificaciones de programas por el usuario, centralizado de la comunicación y recogida de datos. De cara a flexibilizar el sistema, los sistemas de control actuales son modulares, incluyendo dispositivos de visualización de todas las variables que intervienen así como las entradas y las salidas, permitiendo incluso la posibilidad de controlar manualmente la operación del aerogenerador.

Capítulo 3. Desarrollo experimental.

El sistema de control se desarrolla para un aerogenerador de baja potencia, describiéndose en la Tabla 3-1 sus principales características.

Tabla 3-1. Características del aerogenerador de baja potencia [8].

Velocidad de arranque	2 m/s
Velocidad de viento de inicio	3 m/s
Velocidad de viento nominal	10m/s
Velocidad de viento de salida	18 m/s
Velocidad angular de inicio	120 rpm
Velocidad angular nominal	400 rpm
Potencia de inicio	35 W
Potencia nominal	1500 W
Eficiencia de inicio	80%
Eficiencia del generador	90%
Coefficiente de potencia del rotor (C_p)	0.45
Área del rotor eólico	6 m ²
Diámetro del rotor eólico	2.76 m
Radio del rotor eólico	1.38 m

Los valores que se mencionan en la Tabla 3-1 son valores de inicio de operación, valores nominales de operación y valores de desconexión. Para tener un panorama más amplio del funcionamiento del aerogenerador a continuación se presentan las curvas teóricas de operación del aerogenerador [8].

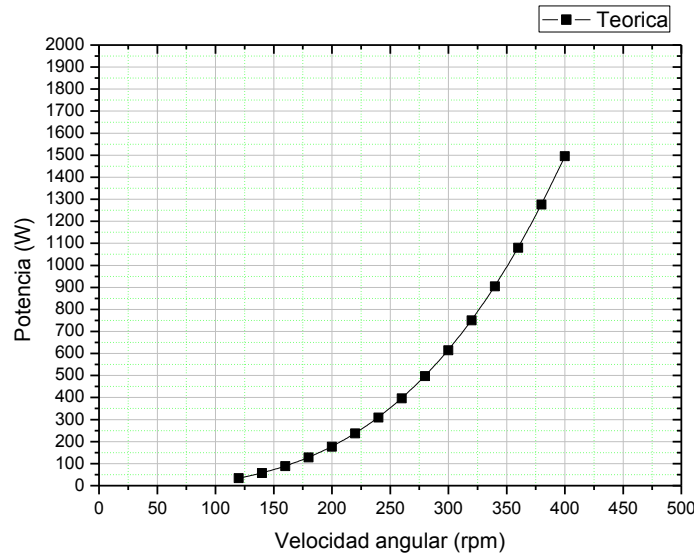


Figura 3-1. Curva teórica de potencia vs velocidad angular del rotor eólico [8].

En la Figura 3-1 se observa cuánta potencia genera el aerogenerador en función de la velocidad angular del rotor eólico, desde su puesta en operación (velocidad de inicio) hasta su operación a potencia nominal (velocidad nominal). El rotor eólico está conectado directamente al rotor del generador eléctrico (generador de imanes permanentes).

Para conocer la potencia generada de acuerdo al viento incidente en el rotor eólico se mide el voltaje y la corriente que genera el generador eléctrico; en la Figura 3-2 se observa el comportamiento teórico del aerogenerador de acuerdo a la velocidad de rotación del rotor eólico. También se observa el comportamiento lineal del voltaje generado y el comportamiento exponencial de la corriente debido a que la potencia que se extrae de la energía cinética viento crece de manera cubica conforme se incremente la velocidad de viento [ecuación 1-10].

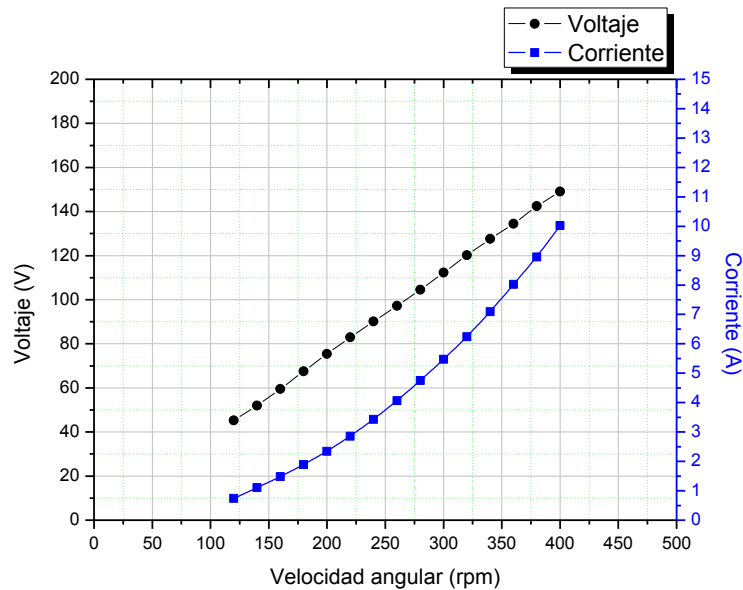


Figura 3-2. Curvas teóricas de voltaje y corriente vs velocidad angular del rotor eólico [8].

Conforme las características teóricas de funcionamiento del aerogenerador se diseñó el sistema de control con la finalidad de mantener operando de manera automática y segura el aerogenerador. Para esto, se realizó lo siguiente:

- 1er. Paso: Diseñar el sistema de supervisión y control.
- 2do. Paso: Diseñar el sistema de comunicación.
- 3er. Paso: Diseñar el sistema central.
- 4to. Paso: Diseñar el sistema de regulación de carga electrónica.

A continuación se describe cada parte del sistema de control.

3.1. Diseño del sistema de supervisión y control

El sistema de supervisión y control consta de dos tarjetas, una que realiza la supervisión de las variables sensadas en el aerogenerador y otra tarjeta que realiza el control (encendido o apagado) del aerogenerador.

Para el desarrollo de la tarjeta que realiza la supervisión del aerogenerador primero se determinaron las variables a monitorear y sus parámetros de operación, estos datos se observan en la Tabla 3-2.

Tabla 3-2. Variables monitoreadas en el aerogenerador.

Variable	Ubicación	Parámetro	Unidad de medida
Velocidad de rotación.	Rotor eólico	0-400	RPM
Voltaje	Rectificador	0-150	V
Corriente	Carga	0-10	A
Temperatura	Generador	0-75	°C
	Rectificador	0-75	°C
	Ambiente	0-50	°C
Vibración	Góndola	Eje "x" y "y"	g (aceleración de la gravedad)

Una vez determinadas las variables a monitorear se realizó el diseño del circuito de la tarjeta de supervisión.

El circuito general del sistema de supervisión y el de control se realizó en el software Proteus; en la Figura 3-3 se presenta el diseño final de la tarjeta de monitoreo del sistema de supervisión y control. Posteriormente se describe cada parte del circuito general del sistema de supervisión.

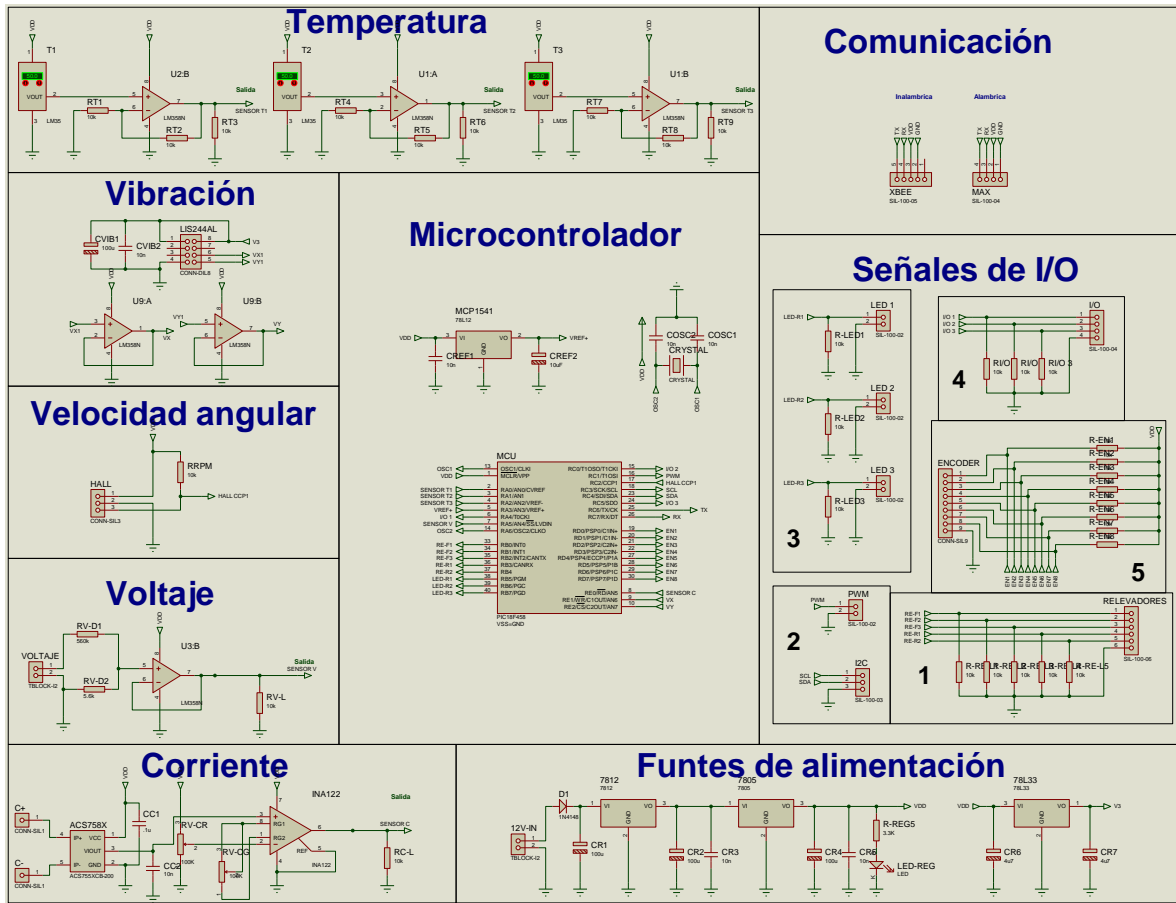


Figura 3-3. Circuito general de sistema de supervisión.

Como se observa en la Figura 3-3 el circuito general de la tarjeta de supervisión del sistema de control consta de los siguientes sub-circuitos:

- Circuito de corriente.
- Circuito de voltaje.
- Circuito de temperatura.
- Circuito de velocidad angular.
- Circuito de vibración.
- Circuito de fuentes de alimentación.
- Circuito de comunicación.
- Circuito de señales de salida.
- Circuito principal (microcontrolador).

3.1.1 Corriente

Para medir cuanta corriente se genera en el aerogenerador se utilizó el sensor ACS7805X200CB, este circuito integrado de precisión genera un voltaje lineal proporcional a la corriente que circula a través de él. El sensor opera bajo el principio de funcionamiento de efecto Hall. En la Figura 3-4 se muestra la curva de calibración del sensor de corriente.

Las características principales del sensor de corriente son:

- El factor de escala es de 10mV/A.
- Precisión de $\pm 1.25\%$ de la corriente que circuló a través de él.
- Rango de temperatura de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $150\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Bajo costo.
- Operación de alimentación de 3 V a 5.5 V

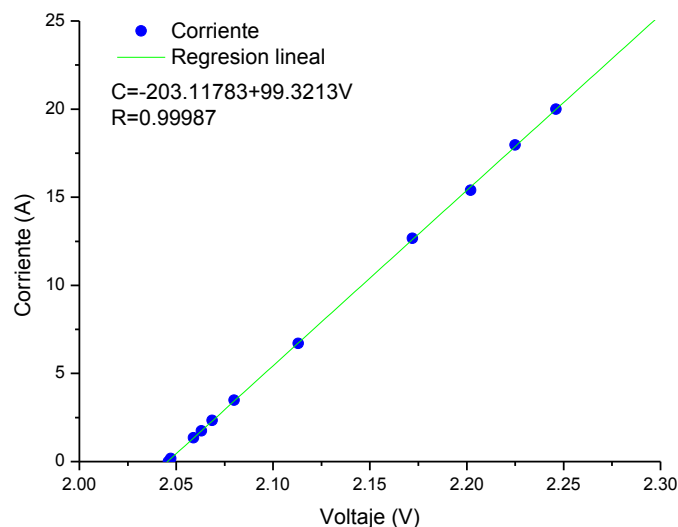


Figura 3-4. Curva de calibración del sensor de corriente.

Debido a que el sensor genera una señal de salida en el rango de milivolts se colocó un amplificador operacional con una ganancia de 9, el amplificador de instrumentación que se utiliza es el INA122, el circuito está diseñado para medir de 0 A a 25 A. El sensor de corriente y su acondicionador de señal se muestran en la Figura 3-5.

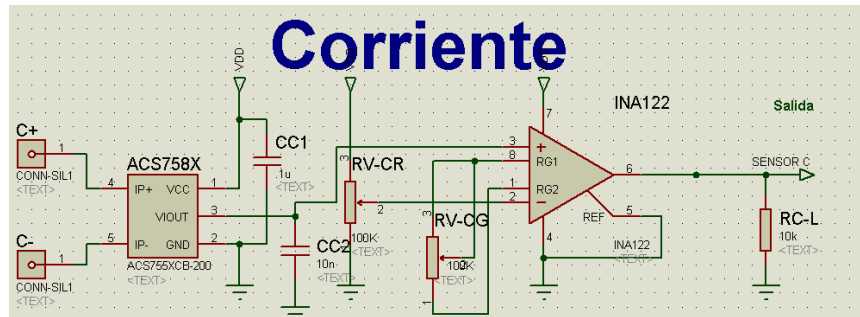


Figura 3-5. Sensor de corriente y acondicionador de señal

3.1.2 Voltaje

El elemento que convierte la energía mecánica en energía eléctrica es el generador eléctrico. El generador que se utiliza en este proyecto es un generador eléctrico de imanes permanentes en estrella. A la salida del generador se colocó un rectificador trifásico con la finalidad de bajar del aerogenerador señal de DC para posteriormente cargar baterías o conectarse a la red a través de un inversor.

El voltaje se mide en el bus de DC a la salida del rectificador trifásico de onda completa no controlado (DF30AA120) utilizando un divisor de voltaje. El divisor está diseñado para medir un voltaje máximo de 500 V con el objetivo de medir el voltaje desde el punto de arranque hasta el punto de desconexión del aerogenerador pasando por su operación nominal (150V a 400 RPM), además de poder medir voltajes mayores con la finalidad de monitorear a futuro algún otro aerogenerador de baja potencia que trabaje dentro de este parámetro de operación.

La curva de calibración del divisor de voltaje se muestra en la Figura 3-6 y el diseño del circuito con su acondicionador de señal se muestra en la Figura 3-7.

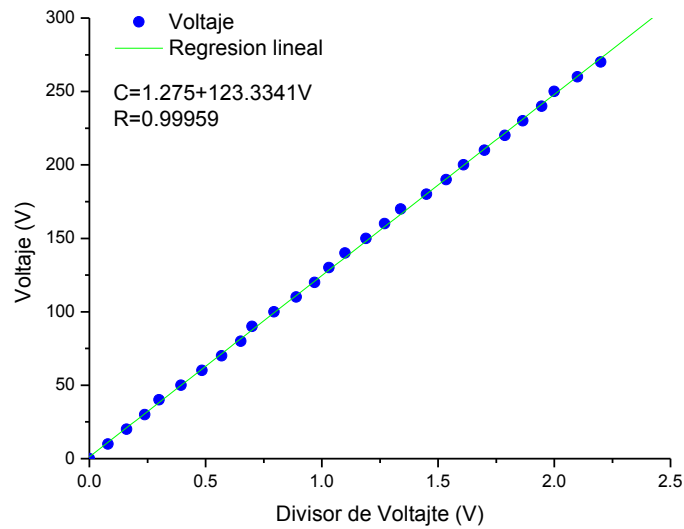


Figura 3-6. Curva de calibración del sensor de voltaje.

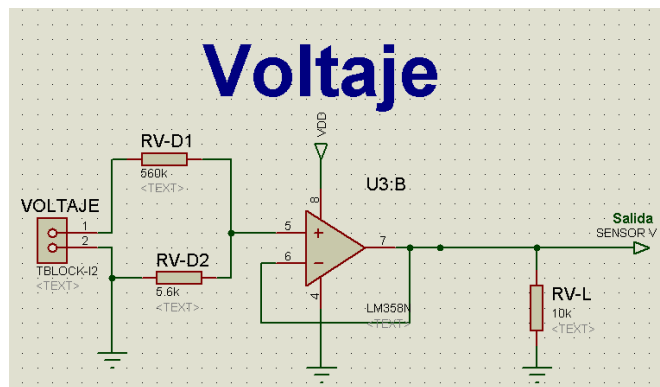


Figura 3-7. Sensor de voltaje con acondicionador de señal.

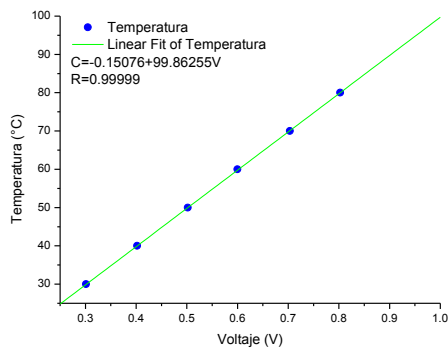
3.1.3 Temperatura.

En el aerogenerador se mide la temperatura en tres puntos importantes (el devanado del generador, el rectificador y el ambiente) esto con el fin de evitar que los dos primeros componentes mencionados trabajen fuera del rango permitido por el fabricante y se dañen. Para la medición de temperatura se utilizó el sensor

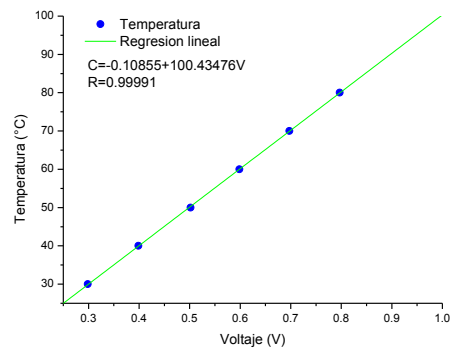
de precisión LM35: a continuación se presentan las principales características de este sensor.

- Lineal con un factor de escala de +10mV/°C.
- Precisión típica de $\pm 1/4$ °C a temperatura ambiente y $\pm 3/4$ °C en su rango de temperatura completa de 0 °C a 100°C.
- Bajo costo
- Fuente de alimentación de 4 V a 30 V.

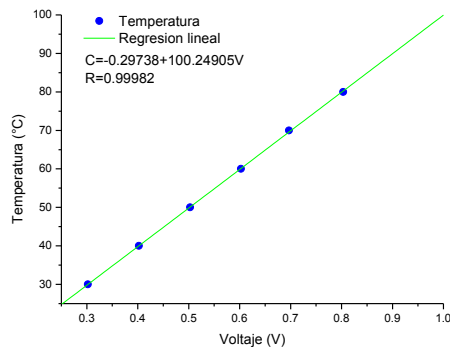
En la Figura 3-8 se muestran las curvas de calibración de los sensores de temperatura con sus respectivas regresiones lineales, en las gráficas se observa la linealidad del sensor LM35.



a)



b)



c)

Figura 3-8. Curvas de calibración de los sensores de temperatura.

Con el sensor de temperatura se utiliza un amplificador operacional para acondicionar la señal al igual que con el sensor de corriente. El amplificador que se utilizó es el LM358 configurado de manera no inversora con una ganancia de 5 para obtener mayor exactitud en la medición de los datos. El circuito está configurado para medir de 0 °C a 100°C. El circuito con los sensores de temperatura y acondicionadores de señal se muestran en la Figura 3-9.

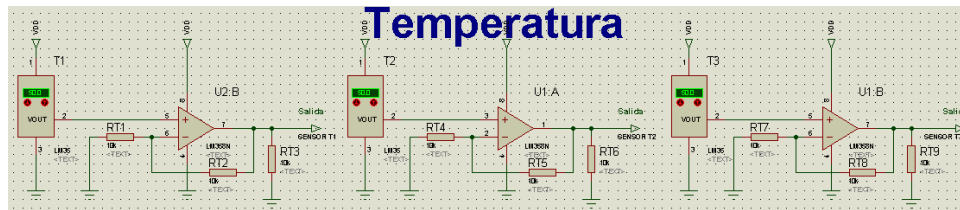


Figura 3-9. Circuito de sensores de temperatura con acondicionadores de señal.

3.1.4 Velocidad angular.

Para medir la velocidad de rotación del rotor eólico se utilizó el sensor DN6851, este sensor es un circuito integrado semiconductor que utiliza el principio de operación del efecto Hall.

Cuando existe la presencia de un campo magnético el sensor entrega a la salida el voltaje de alimentación y cuando desaparece este campo magnético el sensor entrega 0 V (masa). El voltaje de alimentación puede ser de 3.6 V a 16 V.

Se colocó un imán en el rotor del generador y se ubicó el sensor cerca del rotor con el objetivo de medir la frecuencia de giro y posteriormente calcular la velocidad angular del rotor eólico, este proceso se realiza en el microcontrolador por medio del modulo de captura. En la Figura 3-10 se muestra el circuito que mide la velocidad angular. El sensor necesita una resistencia de *pull up*.

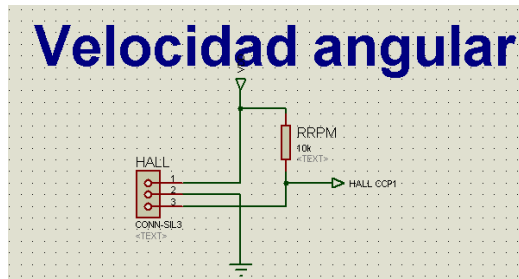


Figura 3-10. Circuito que mide la velocidad angular del rotor eólico.

3.1.5 Vibración.

En primera instancia, la vibración del aerogenerador no será un parámetro a controlar, simplemente se quiere conocer el comportamiento estructural del aerogenerador bajo diferentes estados de operación y regímenes de velocidad de viento. El dispositivo electrónico que se utilizó para medir las oscilaciones mecánicas del aerogenerador es el sensor LIS244AL, este sensor de movimiento MEMS o también conocido como acelerómetro lineal tiene las siguientes características:

- Alimentación de 2.4 V a 3.6 V.
- Medición en 2 ejes (X,Y).
- Rango de aceleración ± 2 g.
- Rango de temperatura de -45 °C a 85 °C.
- Sensibilidad $0.140 \cdot \text{Voltaje de alimentación (V/g)}$.

El circuito para medir la vibración se muestra en la Figura 3-11. En cada salida del sensor se colocó un amplificador operacional configurado como seguidor de voltaje para acondicionar la señal que es procesada por el microcontrolador: el amplificador operacional que se utilizó es el LM358.

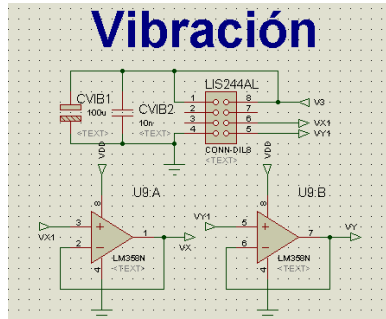


Figura 3-11. Circuito para medir vibración.

3.1.6 Fuentes de alimentación.

La alimentación de la tarjeta de supervisión se realizó con reguladores de voltajes que entregan los valores requeridos para cada sub-sistema. En la Figura 3-12 se muestra un regulador LM7812 en serie con un LM7805: este último entrega 5 V los cuales alimentan a toda la tarjeta del sistema de supervisión a excepción del sensor de vibración que requiere de 2.4 V a 3.6 V de alimentación, para este sensor se utilizó el regulador L78L33C que entrega a la salida 3.3 V, este componente se observa a la derecha de la Figura 3-12 con dos capacitores.

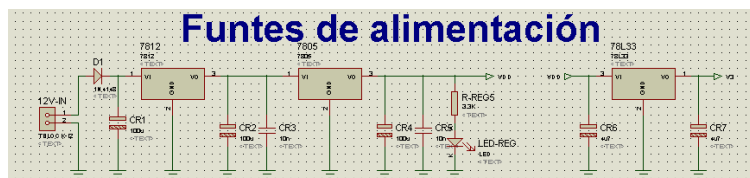


Figura 3-12. Fuentes de alimentación del sistema de supervisión.

3.1.7 Señales de entrada o salida (I/O).

El objetivo de esta sección es interconectar la tarjeta de supervisión con la tarjeta de frenado. Para lograr este objetivo se requiere un conector con 6 señales, además de interconectar los sistemas se utilizan algunos pines del

microcontrolador seleccionado para diferentes propósitos. A continuación se especifica cada sección de la Tabla 3-3.

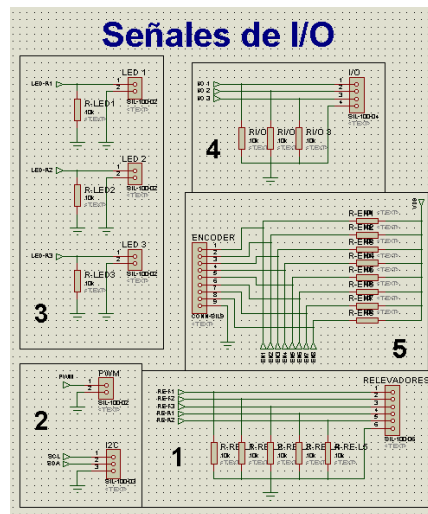


Figura 3-13. Señales de salida del sistema de supervisión.

Tabla 3-3. Descripción de las señales de I/O.

Sección	Descripción	# de señales del microcontrolador
1	Señales que conectan la tarjeta de supervisión a la de frenado, estas señales encienden o detienen el aerogenerador	5
2	Señales de salida para trabajos a futuro en los cuales se requiera utilizar el modulo PWM o el modulo I2C	3
3	Tres señales utilizadas como indicadores de eventos, ej. Se conecta un led y cuando esta encendido indica que el sistema funciona correctamente.	3
4	Señales opcionales de entrada o salida para controlar o indicar algún evento para trabajos futuros.	3
5	Estas señales se pueden utilizar en trabajos a futuro para colocar un encoder absoluto para monitorear la orientación del aerogenerador.	8

3.1.8 Circuito principal.

Una vez que se transforman las variables físicas o químicas por los sensores a señales eléctricas y se acondicionan las señales se requiere de un dispositivo que adquiera, procese y transmita esta información hacia el sistema central. Para realizar estas funciones se utilizó un microcontrolador PIC18F458: el patigrama del microcontrolador PIC18F458 se observa en la Figura 3-14. Las principales características del microcontrolador se mencionan a continuación:

- 8 canales CAD de 10 bits.
- 1 módulo integrado de comunicación serie RS232.
- 5 puertos configurables como entrada o salida.
- Interrupciones con niveles de prioridad.
- Reloj interno de hasta 10MHz .

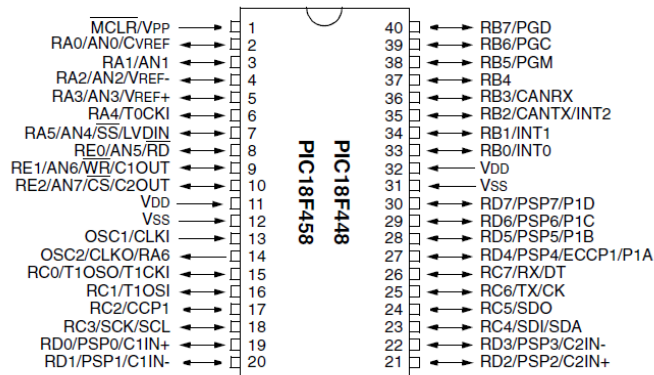


Figura 3-14. Patigrama del microcontrolador PIC18F458.

El componente principal del sistema de supervisión se muestra en la Figura 3-15, en esta figura se observan las conexiones de las señales provenientes de los sensores, las señales de I/O, las señales del módulo de comunicación serie RS232, etc.

Microcontrolador

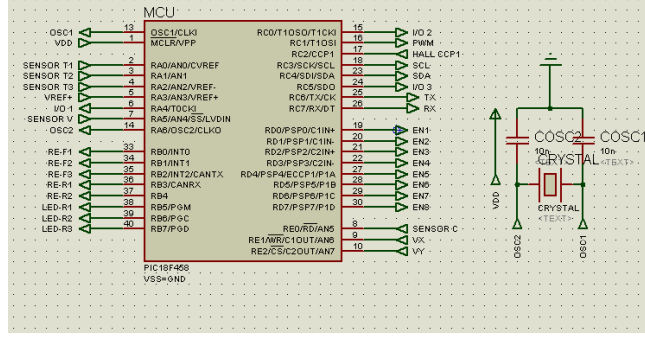


Figura 3-15. Dispositivo principal del sistema de supervisión.

El microcontrolador es el encargado de recolectar y procesar las señales acondicionadas de los sensores, además de realizar la estrategia de control propuesta por el usuario para mantener al aerogenerador operando de manera automática y segura.

3.1.8.1 Estrategia de control.

La estrategia de control propuesta y programada en el microcontrolador del sistema de supervisión se describe a continuación:

Primero se verifica el estado de la variable que se envía desde el sistema central al sistema de supervisión que indica si el operador quiere el aerogenerador encendido o apagado, la opción por default es encendido ya que el aerogenerador debe trabajar aún si no existe comunicación con el sistema central. En el momento que el operador envía la señal de “detener”, el sistema de supervisión envía las señales hacia la tarjeta de frenado y detiene el aerogenerador aún cuando los sensores estén operando dentro de sus parámetros establecidos. Cuando esta variable indica que el aerogenerador debe estar “encendido” se realizan las siguientes acciones.

Se establecen en un inicio los parámetros dentro de los cuales los sensores operan y no activan la señal de alarma que detiene el aerogenerador. Estos parámetros están en función de los manuales de operación de cada componente.

Se lee la señal de cada sensor y posteriormente se envía por medio del puerto serial al sistema central sin importar el estado del aerogenerador con la finalidad de monitorear en tiempo real el aerogenerador.

Para evitar daños al aerogenerador se establece como parámetro límite del sensor de voltaje 170 V, 20 A para el sensor de corriente, 75 °C para sensor de temperatura del generador eléctrico y rectificador. Con el fin de evitar que alguna ráfaga active las señales de freno y detenga el aerogenerador, se promedian las señales durante 10 s y se verifica que cada sensor este dentro de los parámetros mencionados.

Cuando alguna variable está fuera de sus parámetros se activa una señal de alarma que manda las señales de freno a la tarjeta de frenado y se detiene el aerogenerador.

En el caso que la señal de alarma se active menos de 4 veces en una hora, cada detención tendrá una duración de 10 minutos, en el momento que ocurra 4 detenciones en una hora, la cuarta detención va a tener una duración de 1 hora para evitar daños por repetidas detenciones.

Continuamente se envía el estado del aerogenerador al sistema central, en el momento que se detiene el aerogenerador se envía cual señal se activó (ej. sobrecalentamiento del sensor de temperatura del generador) con el objetivo de llevar un registro y en el caso que ocurra un fallo en el sistema de control, rápidamente se detecte dónde ocurrió la falla.

En la Figura 3-16 se muestra el diagrama de flujo programado para el funcionamiento del PIC18F458, siendo la secuencia de pasos la descripción de la estrategia de control.

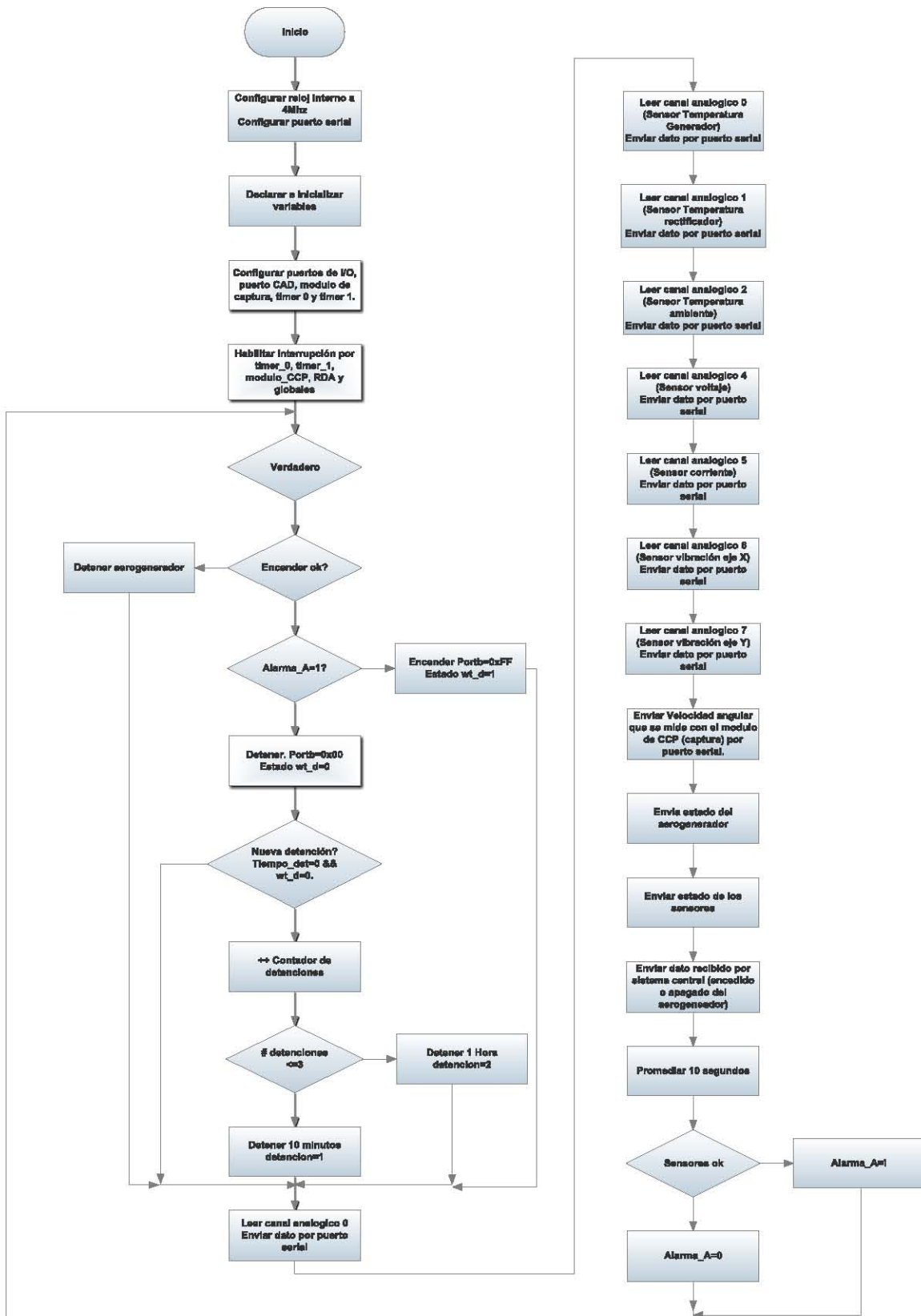


Figura 3-16. Diagrama de flujo del PIC18F458.

Para la medición de la velocidad angular y la recepción de la señal que envía el operador del sistema central que detiene o enciende el aerogenerador se utilizaron las interrupciones del modulo CCP y RDA del microcontrolador. En la Figura 3-17 se muestra el diagrama de flujo de cada interrupción.

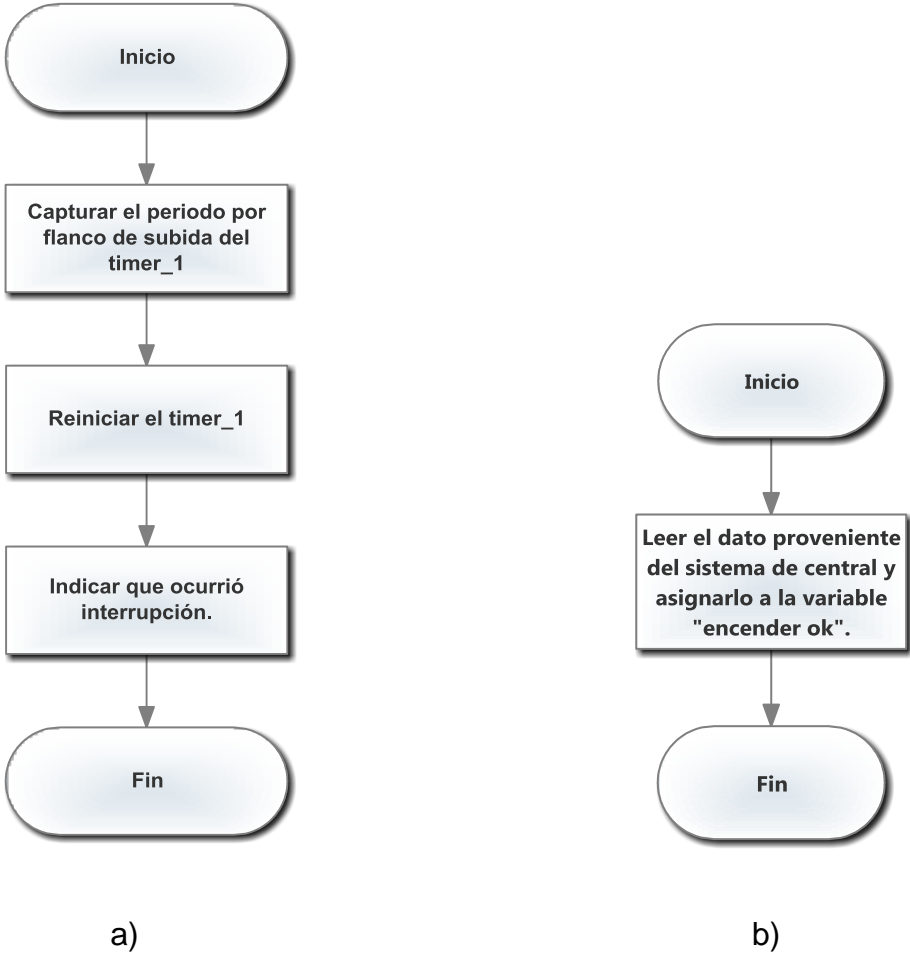


Figura 3-17. Diagrama de flujo de las interrupciones, a) modulo captura y b) modulo recepción de dato.

La tarjeta del sistema de supervisión y control que va dentro de la góndola del aerogenerador se observa en la Figura 3-18.

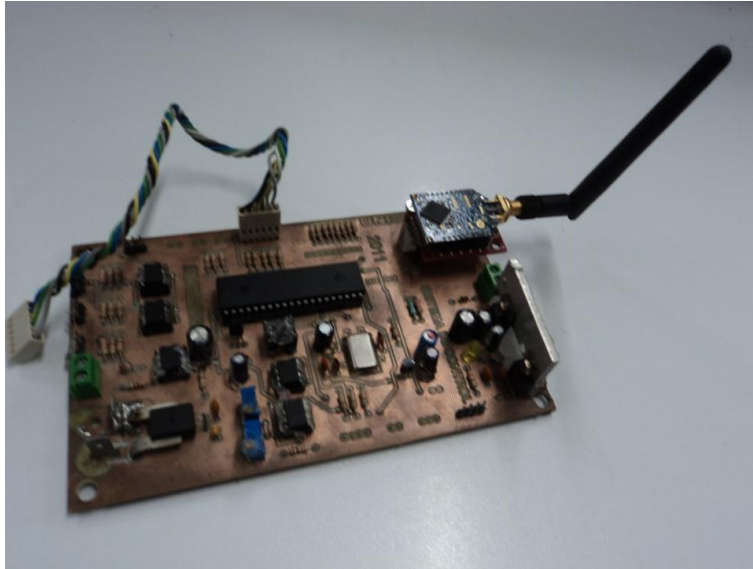


Figura 3-18. Tarjeta de supervisión.

Para realizar la acción de detener o encender el aerogenerador se diseñó la tarjeta de frenado, la cual consta de 5 sub-circuitos:

- Fuente de alimentación.
- Freno principal.
- Freno de emergencia.
- Señales de entrada.
- Resistencia de carga (opcional).

El circuito general de la tarjeta de frenado se observa en la Figura 3-19.

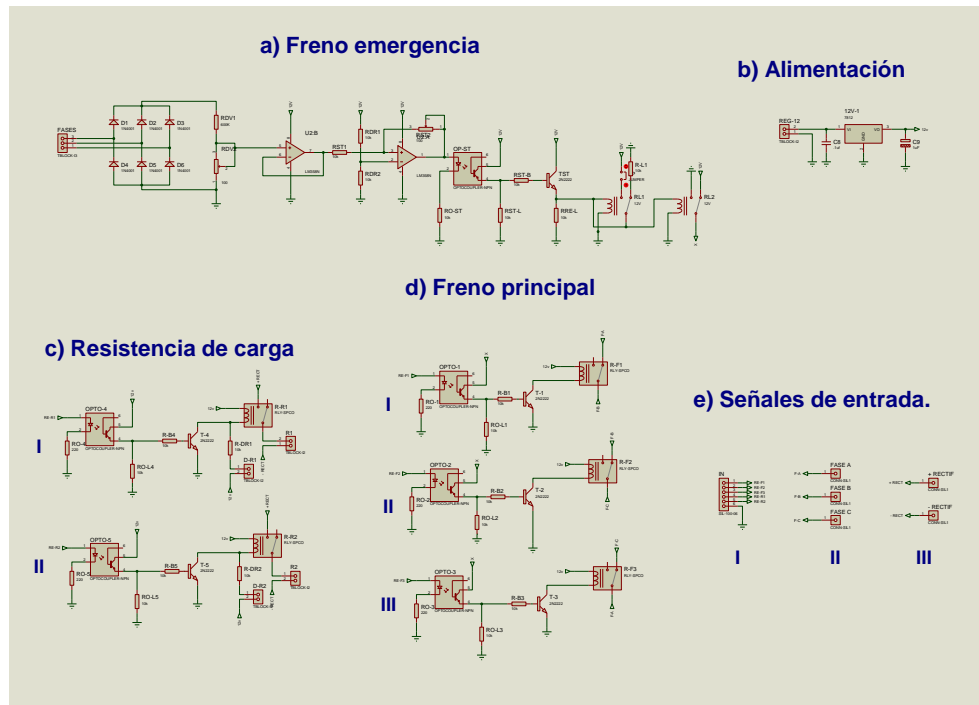


Figura 3-19. Circuito general de la tarjeta de frenado del aerogenerador.

En la Figura 3-19-a) se observa el circuito del freno de emergencia, cuyo objetivo es detener el aerogenerador cuando fallen las señales que activan el freno principal.

Si ocurre el caso en el que fallen las señales que activan el freno principal, el freno de emergencia entra en funcionamiento automáticamente. Esto sucede cuando el aerogenerador genera un 25 % más del voltaje nominal establecido (150 V). El circuito del freno de emergencia se diseñó con la opción de cambiar este porcentaje para trabajos de investigación a futuro.

Cuando se activa el freno de emergencia se detiene el aerogenerador. Es importante señalar que no se desactiva el freno de emergencia con el paso del tiempo sino hasta que el encargado del aerogenerador reinicia el sistema, lo que ayuda a verificar el motivo de la falla.

No se requiere de señales externas para que se active el freno de emergencia, únicamente se mide el voltaje generado y cuando éste llega al valor determinado (30 % mayor al valor nominal) automáticamente activa el freno de emergencia que

a la vez activa el freno principal y detiene el movimiento del rotor eólico. El freno de emergencia funciona independientemente del sistema de regulación habitual.

La fuente de alimentación proporciona 12 V para alimentar los relevadores utilizados en el freno principal, freno de emergencia y resistencia de carga. Para esto se utilizó un regulador LM7812 como se observa en la Figura 3-19-b).

En la Figura 3-19-c) se presenta el circuito que activa la conexión de las resistencias de carga en el aerogenerador, cuya función es la de mantener la potencia nominal y la velocidad angular nominal del rotor eólico a velocidades de viento mayores a la establecida como velocidad de viento nominal. Para este trabajo se diseñó e implementó en la tarjeta de frenado el sistema que activa o desactiva las resistencias de carga, se hicieron pruebas de funcionamiento pero no se implementaron en las pruebas de campo. Quedó como una opción para trabajos de investigación a futuro.

El freno principal es el encargado de encender o detener el aerogenerador, el circuito que realiza esta función se observa en la Figura 3-19-d): este circuito activa o desactiva relevadores los cuales son los encargados de cortocircuitar el generador eléctrico para detener el movimiento del rotor del mismo.

En la Figura 3-19-e) se muestran las señales de entrada de la tarjeta de frenado, en seguida se describe cada sección:

- I. Conector con 5 señales provenientes de la tarjeta de supervisión que activan o desactivan el freno principal y las resistencias de carga.
- II. 3 terminales en el cual se conectan las 3 fases del generador eléctrico en estrella.
- III. 2 terminales para conectar las resistencias de carga.

La tarjeta de frenado se observa en la Figura 3-20.

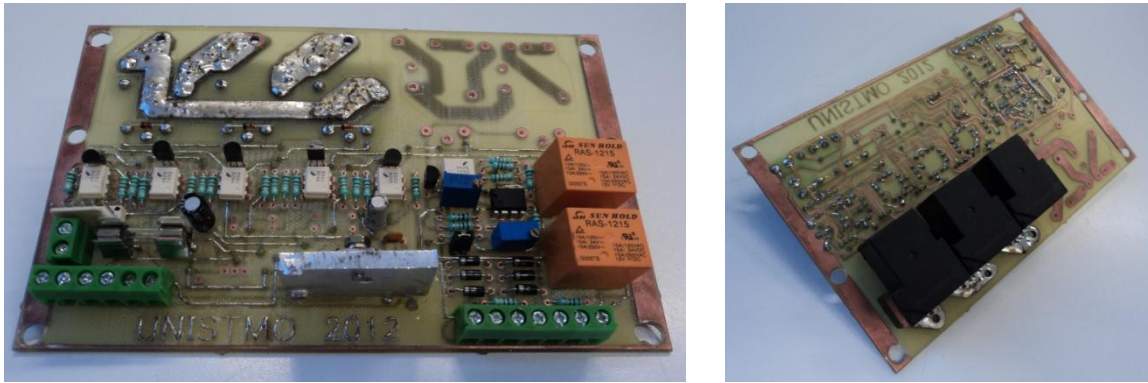


Figura 3-20. Tarjeta de frenado del aerogenerador de baja potencia.

3.2 Diseño del sistema de comunicación.

El sistema de comunicación que enlaza al sistema central con el sistema de supervisión y control se realiza por medio del puerto serial, la transmisión de la información se realiza de dos formas:

Sistema de comunicación alámbrico: Se utiliza para realizar pruebas de laboratorio del sistema de control cuando no se cuenta con el sistema inalámbrico, para esto se utiliza un MAX232 con 4 capacitores y un cable convertidor USB a serial debido a la falta de puerto serial en las computadoras actuales. En la Figura 3-21 se observa el sistema de comunicación alámbrico, el lado del puerto USB se conecta a la computadora donde se encuentra instalado el sistema central y el sistema de supervisión y control se conecta a los 4 pines ubicados en la tarjeta del MAX232.

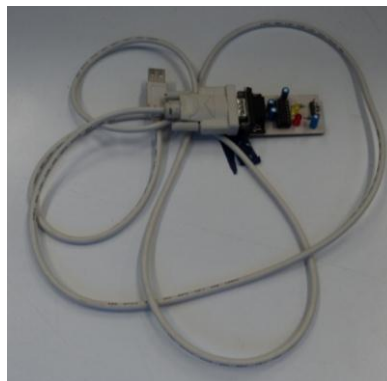


Figura 3-21. Sistema de comunicación alámbrico.

Sistema de comunicación inalámbrico: Este sistema se emplea en pruebas de laboratorio y cuando el aerogenerador opera en la torre. Se utilizaron dos módulos XBee-Pro 900 para la comunicación inalámbrica, las principales características de los módulos RF son: tienen un alcance de hasta 10 km con antenas de alta ganancia, operan dentro de la banda de frecuencia ISM de 900 MHz, utiliza CMOS serial UART como interface de datos y es fácil de configurar. En la Figura 3-22 se muestran los 2 módulos con sus adaptadores XBee Explorer Regulated y USB.

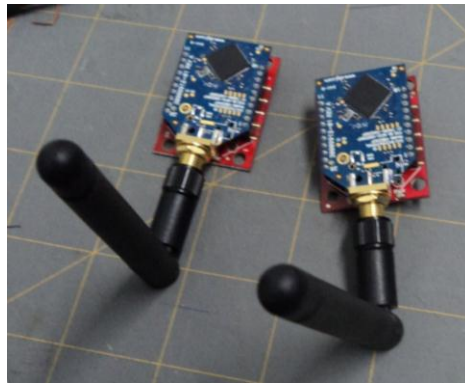


Figura 3-22. Módulos inalámbricos XBee Pro 900.

3.3 Diseño del sistema central.

El sistema central es la interface operador-aerogenerador, cuenta con la capacidad de enviar y recibir información del sistema de supervisión y control a través del sistema de comunicación.

El objetivo del sistema central es procesar, analizar, visualizar y almacenar la información procedente de los sensores e información de acciones realizadas en el aerogenerador (ej. un paro por anomalía de funcionamiento de un sensor), además de tener la capacidad de enviar indicaciones de encender o detener el aerogenerador cuando el operador lo solicita. En la Figura 3-23 se observa el diagrama de flujo que se emplea para el desarrollo de la programación del sistema central.

La estrategia de control que realiza el sistema central es la siguiente: Primero se configura el puerto serial y se inicia una sesión VISA, después se lee y se confirma cada señal enviada desde el sistema de supervisión y control, una vez que se reciben todos los datos se calcula el valor analógico de cada sensor por medio de su regresión lineal.

Luego se lee el valor de la variable que controla el encendido o apagado del aerogenerador por el operador y se envía al sistema de supervisión y control. El siguiente paso es desplegar en indicadores gráficos los valores de cada sensor y el estado del aerogenerador, a continuación se verifica que las señales de los sensores estén dentro de los parámetros establecidos y el resultado se envía a los indicadores llamados “alarmas”.

En la última etapa se genera un reporte con la información de todos los sensores, alarmas activadas y sensores activados. Posteriormente se verifica si se quiere continuar con la recepción y envío de datos. Finalmente cuando se determina detener la comunicación serial se cierra la sesión VISA y se finaliza el programa.

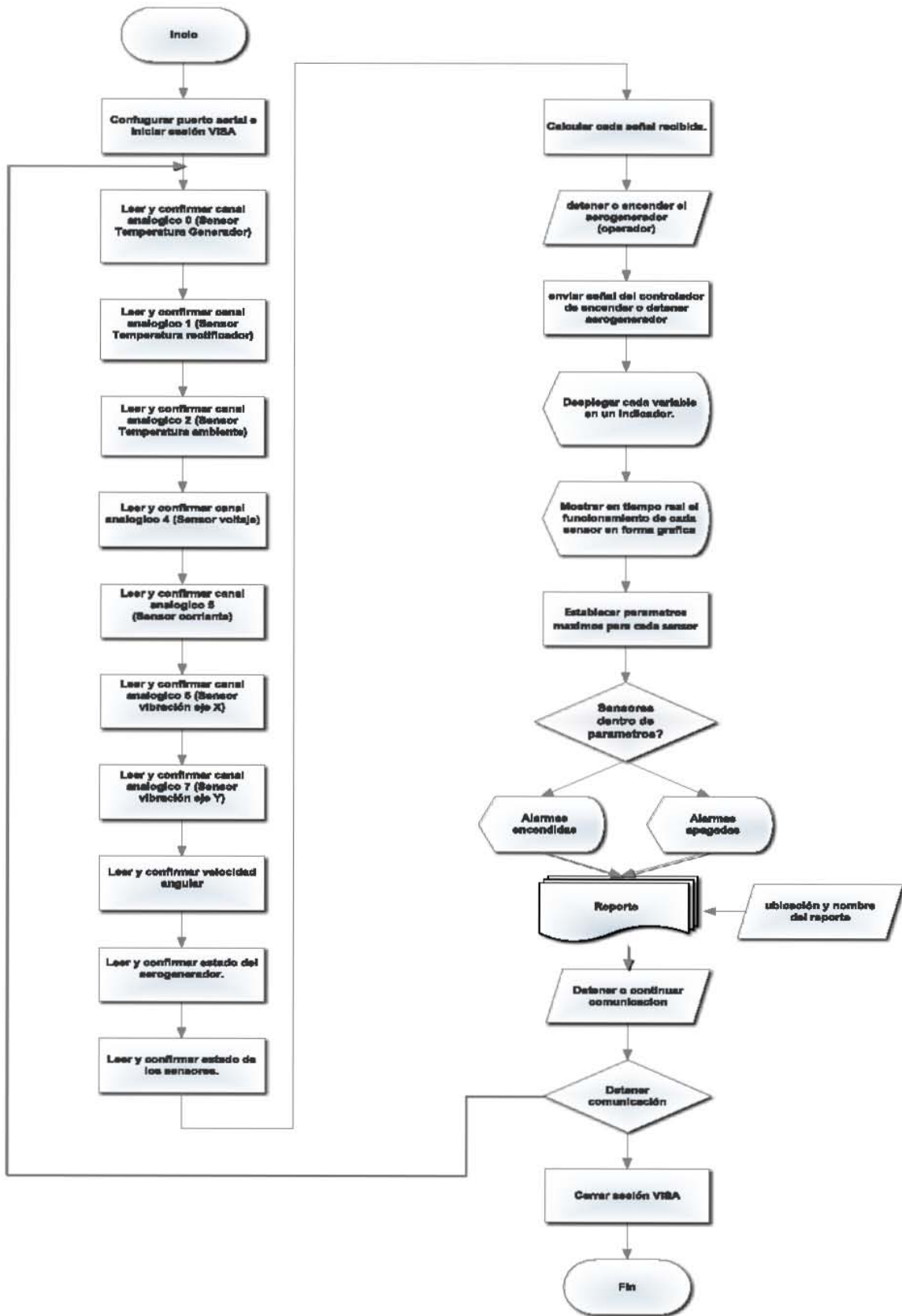


Figura 3-23. Diagrama de flujo del sistema central.

El diseño del sistema central se realizó en LabView. A continuación se presenta el diagrama en bloques del sistema central.

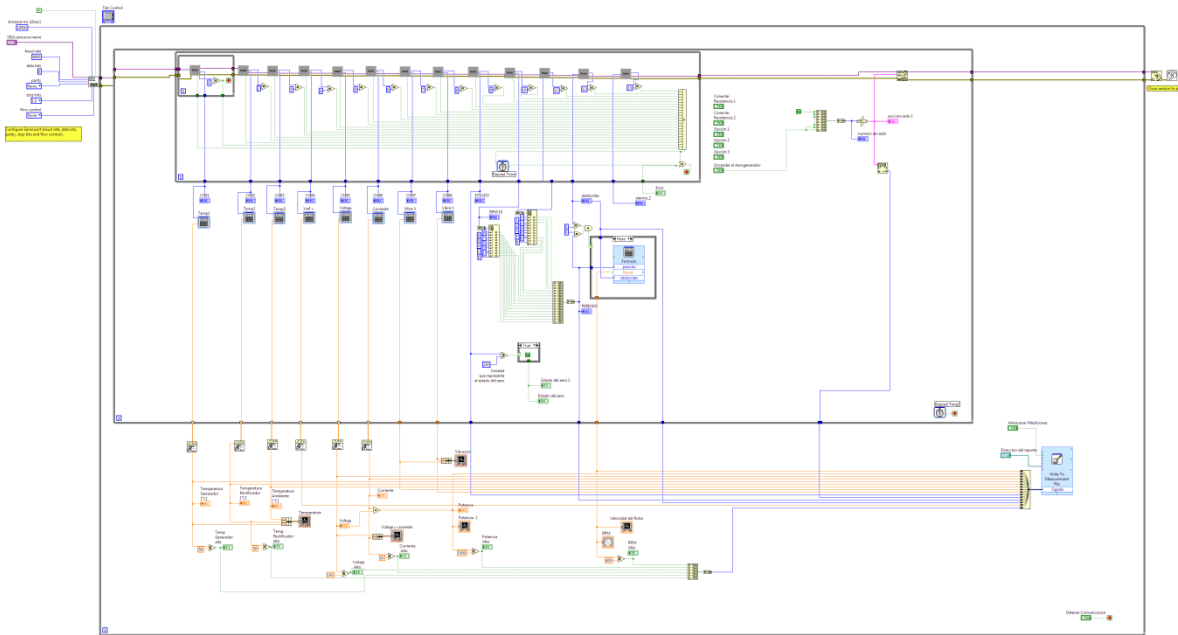


Figura 3-24. Diagrama en bloques del sistema central.

Como resultado de la programación gráfica se obtiene el panel frontal del sistema central que es la interface entre el operador y el aerogenerador, el panel frontal cuenta con 4 ventanas (pantallas) y los indicadores superiores (alarma y estado del aerogenerador).

La primera ventana principal del sistema central se muestra en la Figura 3-25, en esta ventana se observan los indicadores de las variables potencia, corriente, voltaje, temperatura y velocidad angular, además de los indicadores de alarmas que están en la parte superior derecha. Estos indicadores llamados “alarmas” se activan cuando algún sensor marca un valor superior a los establecidos por el operador.

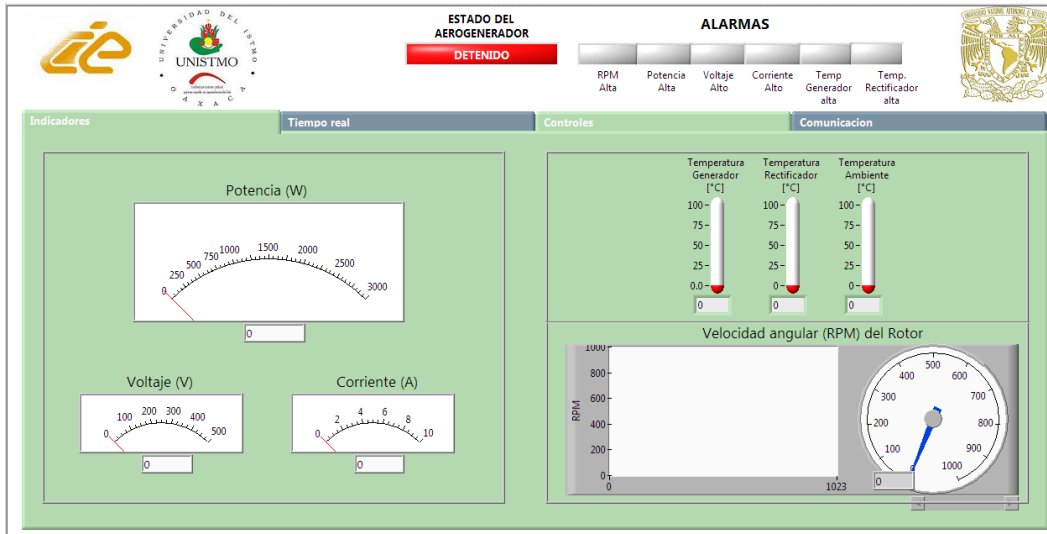


Figura 3-25. Pantalla principal del sistema central.

En la segunda ventana se grafican las señales de los sensores con la finalidad que el operador visualice el comportamiento de cada señal conforme transcurre el tiempo.

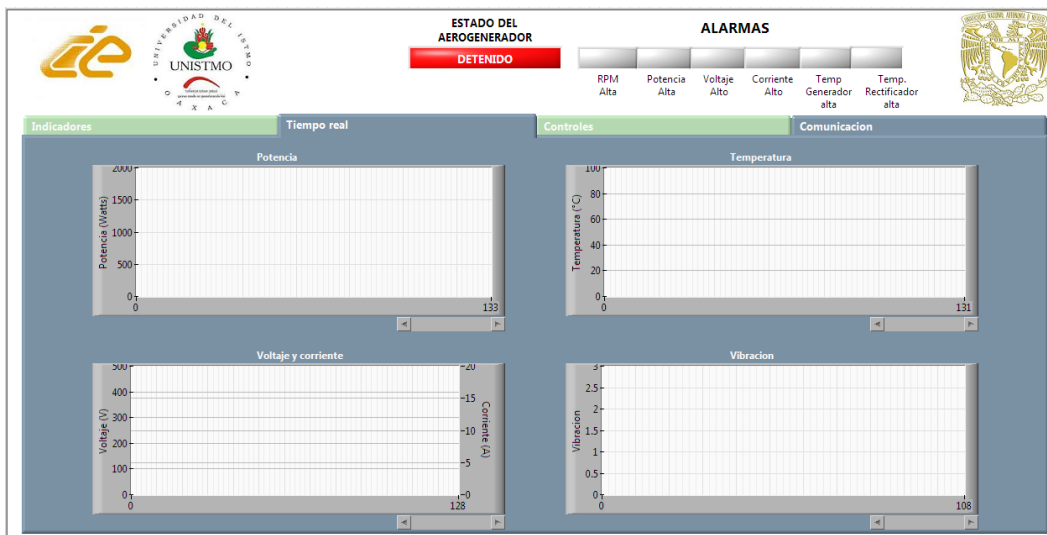


Figura 3-26. Historial de sensores.

La tercer ventana del panel frontal del sistema central se presenta en la Figura 3-27. En esta ventana se observa de izquierda a derecha los controles para verificar el funcionamiento de los relevadores que se utilizan para efectuar el frenado del aerogenerador, después se observan los controles que conectan o

desconectan las resistencias de carga y por último el control del encendido y apagado del aerogenerador.

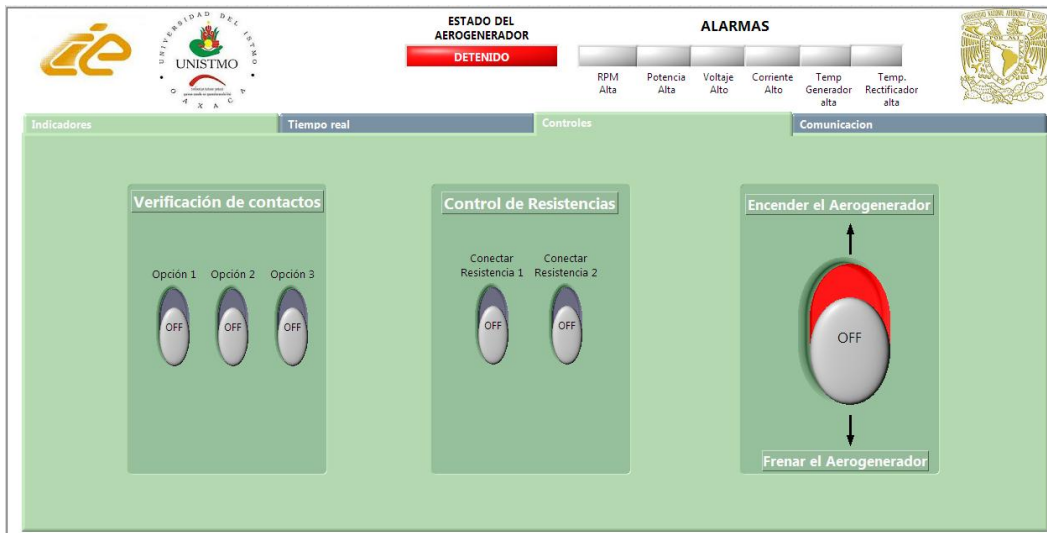


Figura 3-27. Controladores del aerogenerador.

La cuarta ventana del sistema central se observa en la Figura 3-28, en esta ventana se selecciona el puerto serial a utilizar, la dirección donde se guarda el reporte y por ultimo se cuenta con 2 opciones, una para detener el almacenamiento de la información en el reporte y otra para detener la comunicación del sistema central con el sistema de supervisión y control.

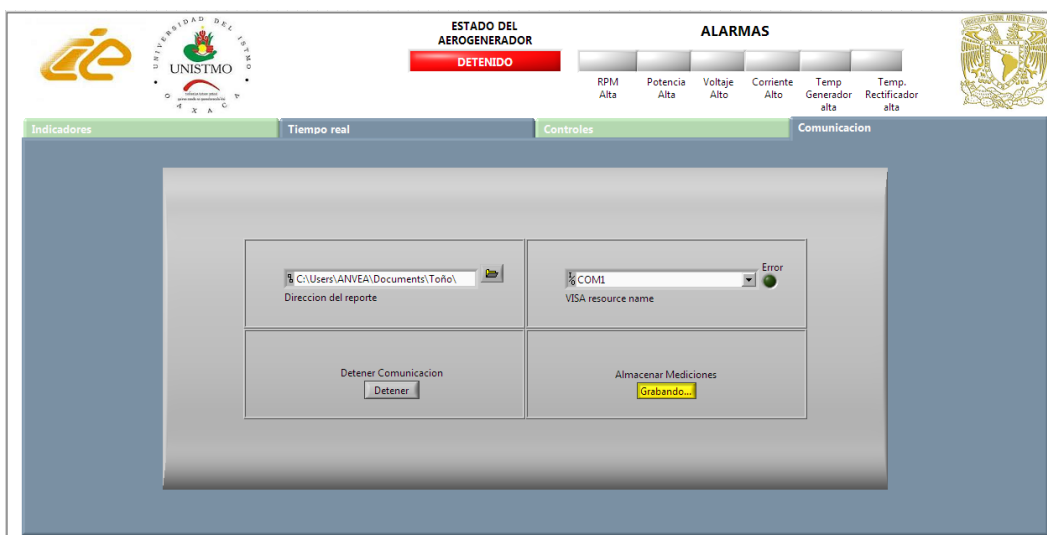


Figura 3-28. Configuración de comunicación.

Con el sistema central se tiene la posibilidad de monitorear y caracterizar el aerogenerador, además de ser una herramienta importante para trabajos de investigación por su versatilidad, ya que en él se pueden probar diferentes estrategias de control y observar el funcionamiento del aerogenerador.

Se diseñó el sistema de regulación de carga electrónica que permite la operación del aerogenerador a velocidades de viento superior a la nominal, el cual se describe a continuación.

3.4 Diseño del sistema de regulación de carga electrónica.

El sistema de regulación de carga electrónica tiene como objetivo mantener constante la velocidad angular nominal del rotor eólico a velocidades de viento superior a la nominal. Para esto se mide el voltaje que genera el aerogenerador en el bus de DC ya que es directamente proporcional a la velocidad angular del rotor eólico (Figura 3-2), cuando esta medición de voltaje es superior al voltaje establecido como nominal se aumenta gradualmente la carga lo que provoca un aumento en el torque del rotor del generador eléctrico y evita que la velocidad angular del rotor eólico aumente.

De esta manera la velocidad angular del rotor eólico se mantiene constantes y por tanto entra en pérdida aerodinámica por el sistema *stall* control. Este efecto teórico se observa en la Figura 3-29.

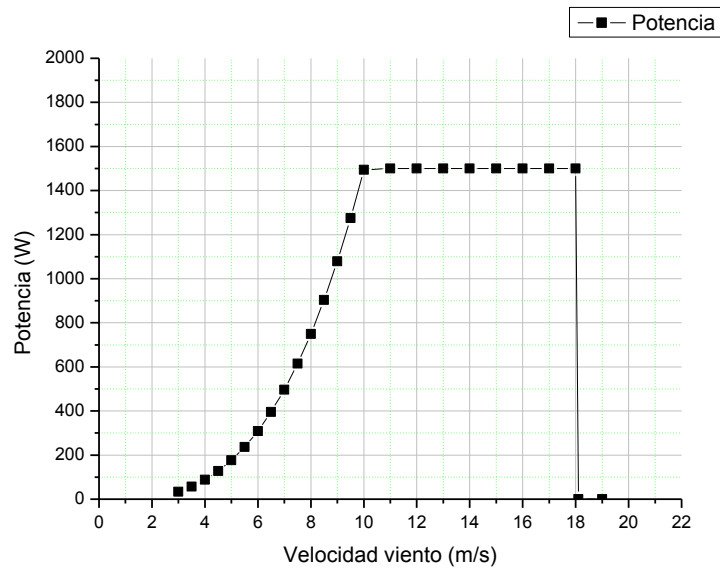


Figura 3-29. Efecto teórico del sistema de regulación de carga electrónica.

El diseño del sistema de regulación de carga electrónica se presenta en la Figura 3-30. El circuito general consta de un sensor de voltaje, un sensor de corriente, fuentes de alimentación, terminales para conectar la carga y el bus de DC, un microcontrolador y un acondicionador de señal para el transistor bipolar de puerta aislada (IGBT).

El IGBT se utiliza como un interruptor controlado lo que permite variar el voltaje en las terminales de una resistencia fija y de esta manera variar la potencia disipada en la carga (resistencia fija)

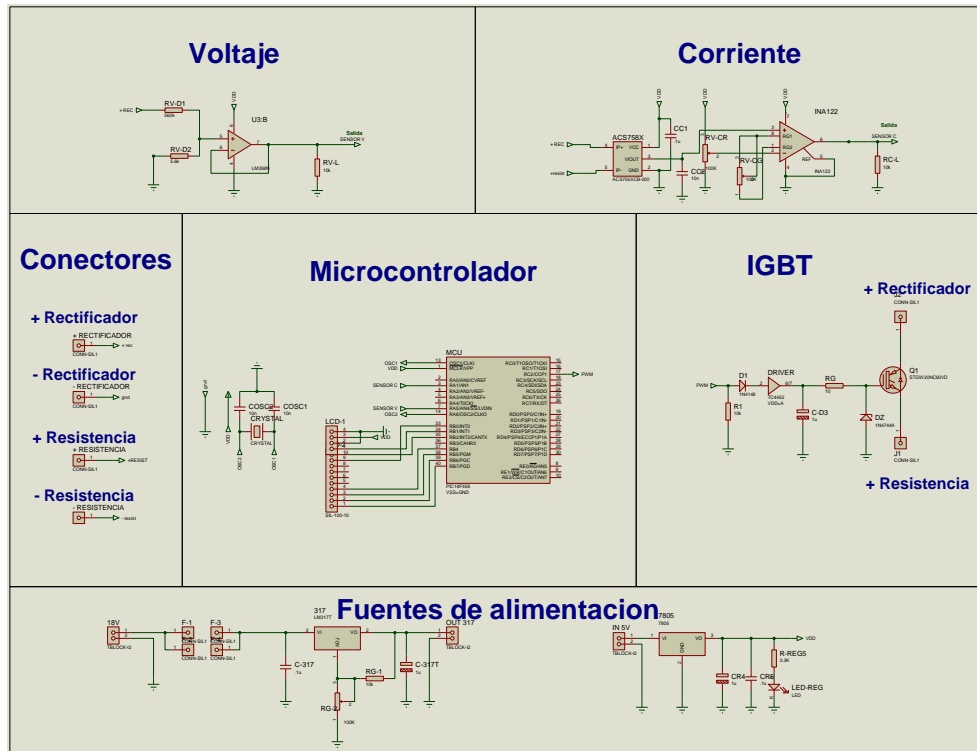


Figura 3-30. Circuito general del sistema de regulación de carga electrónica.

El microcontrolador realiza el control del IGBT mediante el modulo PWM (modulación de ancho de pulso) con una frecuencia de conmutación alta (10kHz) en función de la medición registrada por el sensor de voltaje. Las principales características del IGBT que se utilizó son $V_{CES}=1300\text{ V}$, $I_c=33\text{ A}$ a 100°C , temperatura de operación de $-55\text{ }^\circ\text{C}$ a $150\text{ }^\circ\text{C}$.

La tarjeta del sistema de regulación de carga electrónica se muestra en la Figura 3-31. En la parte superior se observa el IGBT ubicado en un disipador de calor con la finalidad de evitar que se dañe por sobre calentamiento.

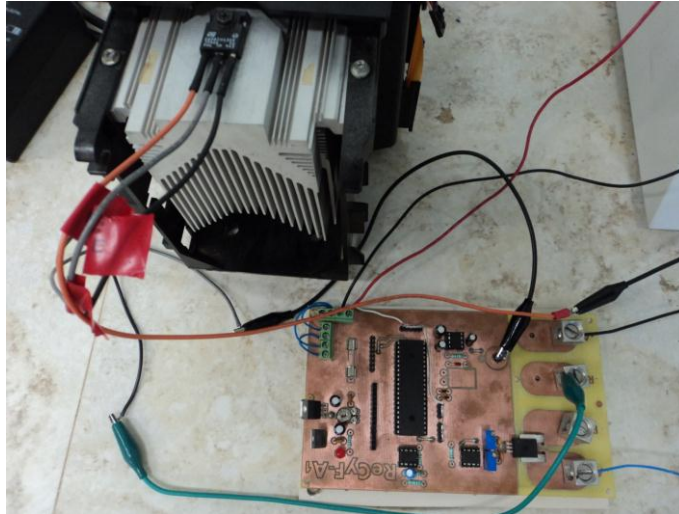


Figura 3-31. Tarjeta del sistema de regulación de carga electrónica.

Se utilizaron dos resistencias de 30 Ohm en paralelo con la capacidad de disipar 1 kW cada una. Las resistencias de carga se muestran en la Figura 3-32.

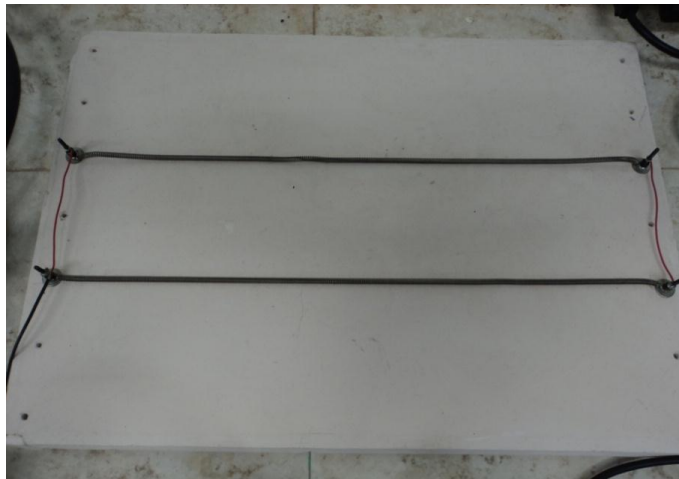


Figura 3-32. Resistencias de carga.

La estrategia que se implementó en el sistema de regulación de carga electrónica se describe en la Figura 3-33.

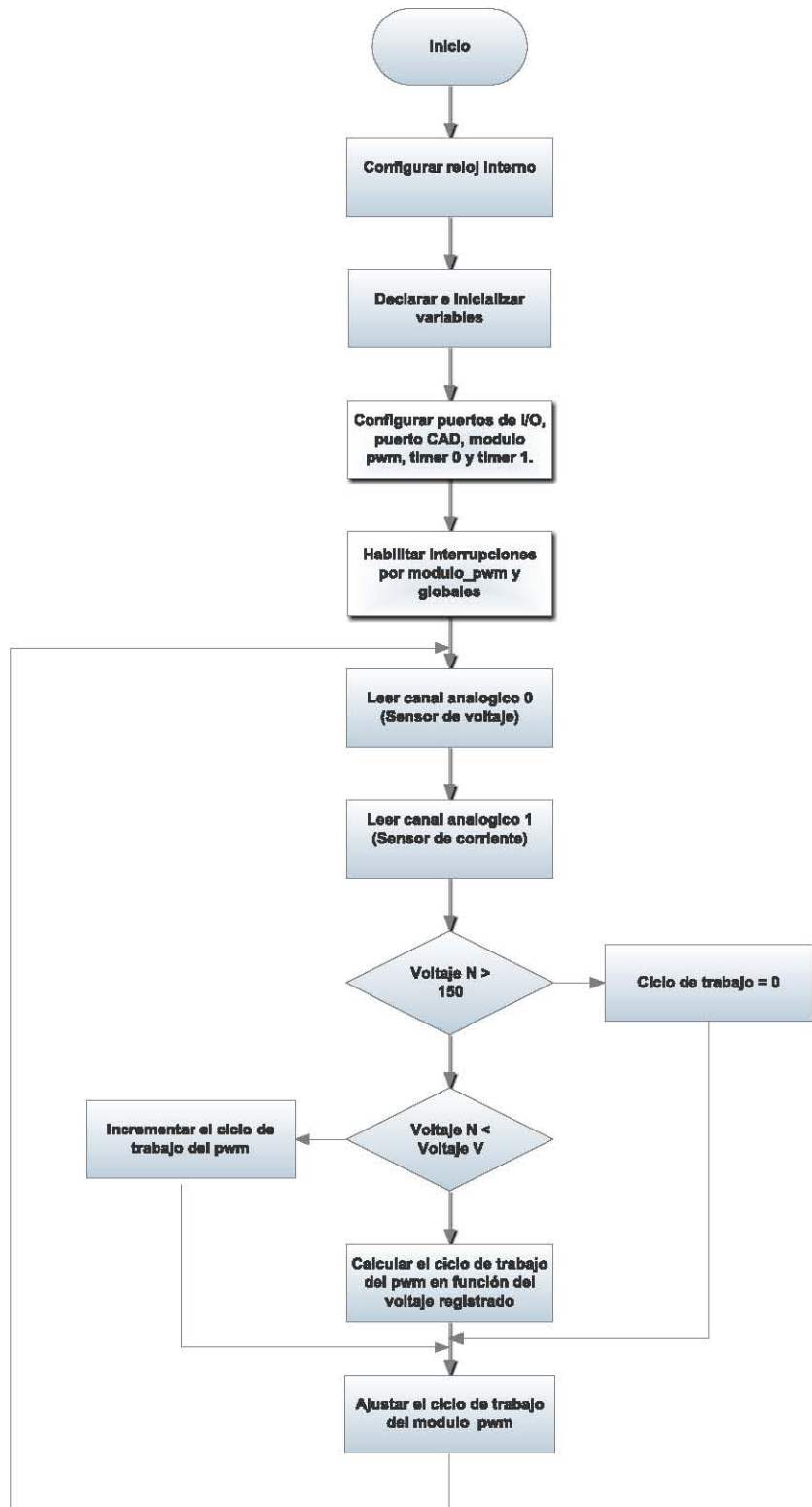


Figura 3-33. Estrategia de control del sistema de regulación de carga electrónica.

Capítulo 4. Pruebas y resultados.

En este capítulo se muestran las pruebas realizadas al generador eléctrico con un torno eléctrico y los resultados obtenidos de mediciones de campo del sistema de control del aerogenerador de 1.5 kW para el día 21 de septiembre del 2012, dichas mediciones se realizaron en la Universidad del Istmo (UNISTMO) Campus Tehuantepec ubicada en el Istmo de Tehuantepec, Oaxaca, México.

En la Figura 4-1 se observa la prueba de circuito abierto que se realizó al generador eléctrico ubicado dentro de la góndola para medir el voltaje que genera bajo diferentes regímenes de giro.



Figura 4-1. Prueba de circuito abierto del generador eléctrico.

Los resultados obtenidos de la prueba de circuito abierto se muestran en la Figura 4-2. En esta gráfica se observa el comportamiento lineal del voltaje medido en el generador eléctrico en función de la velocidad angular del rotor.

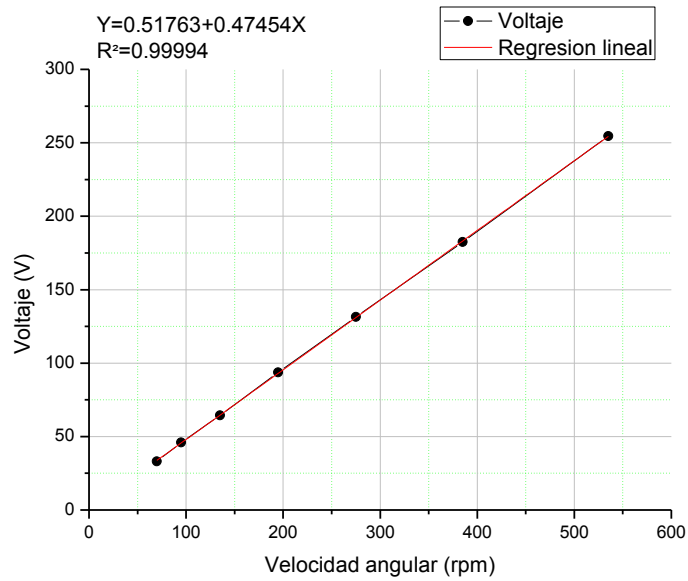


Figura 4-2. Resultados de la prueba de circuito abierto del generador eléctrico.

Una vez realizada la prueba de circuito abierto se ensambló el aerogenerador y se colocó en la torre de prueba de la UNISTMO como se observa en la Figura 4-3. La torre tiene una altura de 12 m.



Figura 4-3. Aerogenerador ubicado en la torre de prueba de la UNISTMO.

Una vez instalado el aerogenerador se utilizó un inversor Hallen CTW-2KS que realiza el seguimiento del punto de máxima potencia e inyecta la energía que se genera a la red eléctrica.



Figura 4-4. Inversor Hallen CTW-2KS

El inversor mantiene al aerogenerador en su punto de máxima potencia desde la velocidad de inicio hasta la velocidad nominal. Cuando la velocidad del viento es

mayor a la nominal entra en funcionamiento el sistema de regulación de carga electrónica para mantener constante la velocidad angular del rotor eléctrico.

El sistema central se programó para visualizar y almacenar cada segundo todos los parámetros que intervienen en la operación del aerogenerador. Estos parámetros se ilustran en la Figura 4-5 donde se observa la pantalla principal del sistema central. En ésta se observan las temperaturas en tiempo real del ambiente (43.4°C), del rectificador (51.3°C) y del generador (53.4°C).

En esta misma pantalla se puede observar la gráfica donde se visualiza la velocidad angular del rotor eólico que muestra y grafica la variabilidad del viento conforme transcurre el tiempo. Así mismo se puede observar la velocidad angular instantánea en el tacómetro (342.6 rpm).

En la parte izquierda de la pantalla se visualizan las mediciones instantáneas de potencia (674.51 W), voltaje (137.86 V) y corriente (4.89 A).

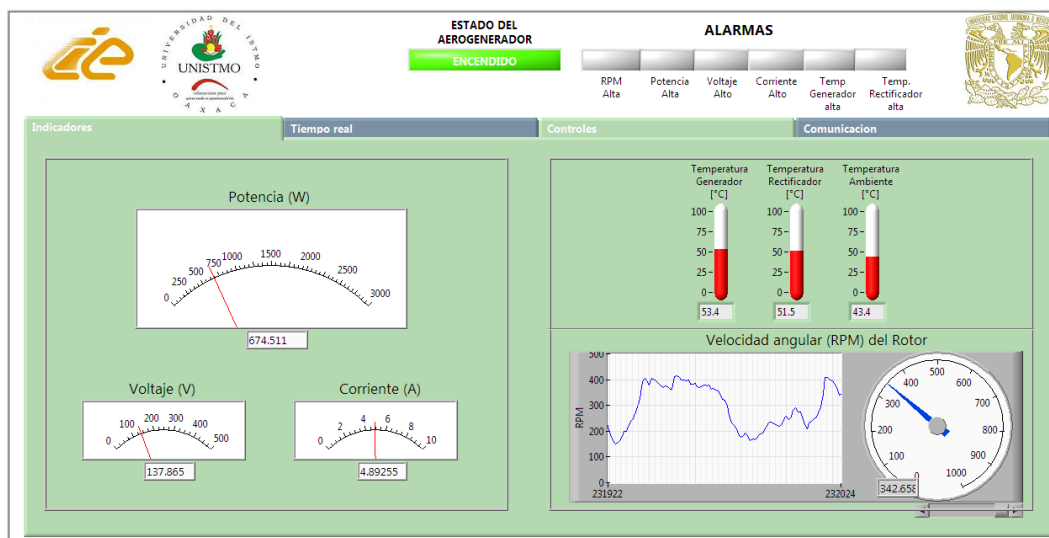


Figura 4-5. Pantalla principal del sistema central en operación.

El historial de sensores se ilustra en la Figura 4-6 donde se muestra el comportamiento en tiempo real de las variables potencia, voltaje, corriente, temperatura y vibración que intervienen en el desempeño aerogenerador.

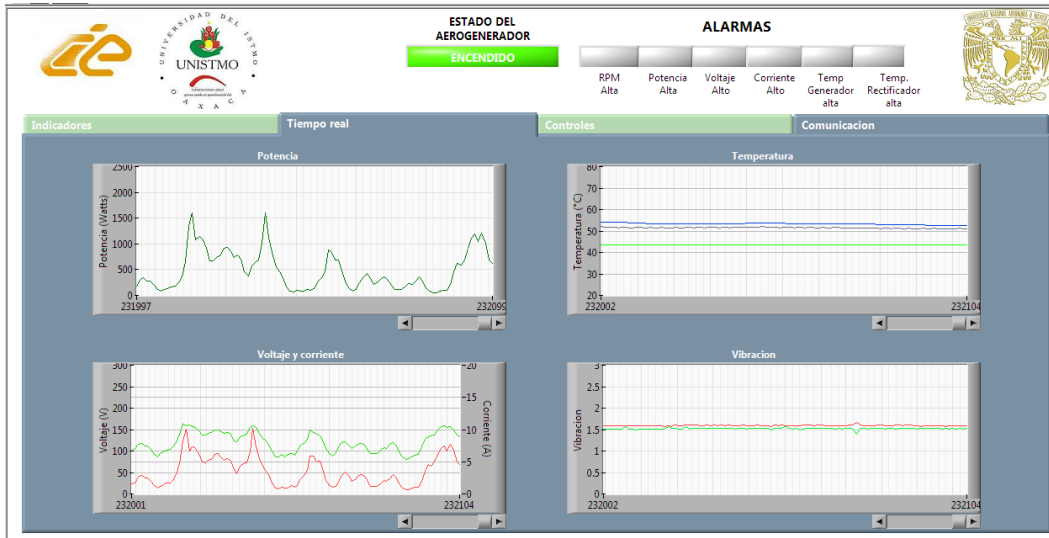


Figura 4-6. Historial de sensores en operación.

En la Figura 4-7 se observa que el aerogenerador se encuentra encendido y operando y que los controles de conexión de resistencias de cargas y de verificación de contactos de sistema de freno están desactivados.

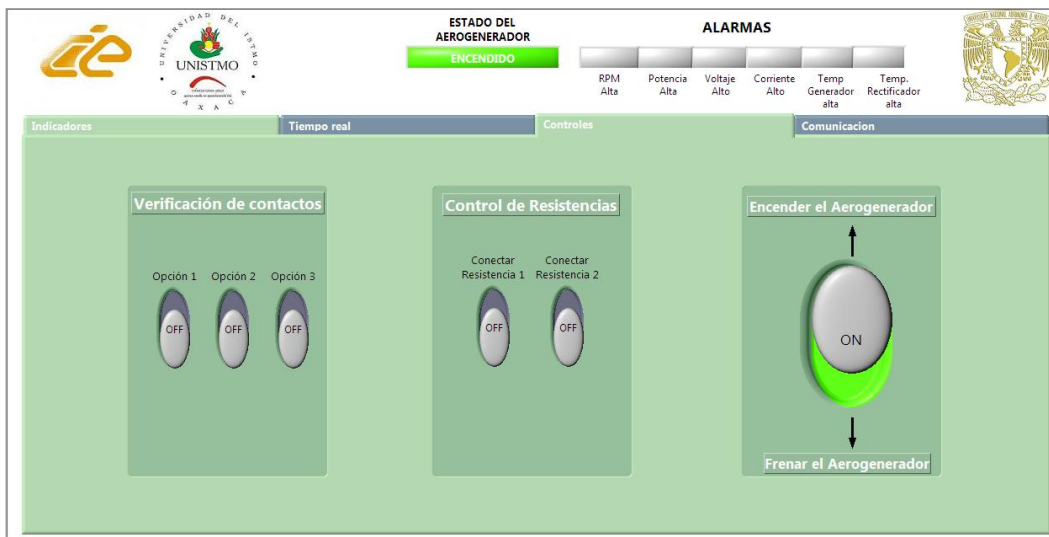


Figura 4-7. Controladores del aerogenerador en operación.

En la Figura 4-8 se observa que el puerto serial activo es COM3, la dirección en la que se almacenan los reportes con la información de los sensores y el estado del aerogenerador es C:\Users\ANVEA\Documents\Toño\Reportes.

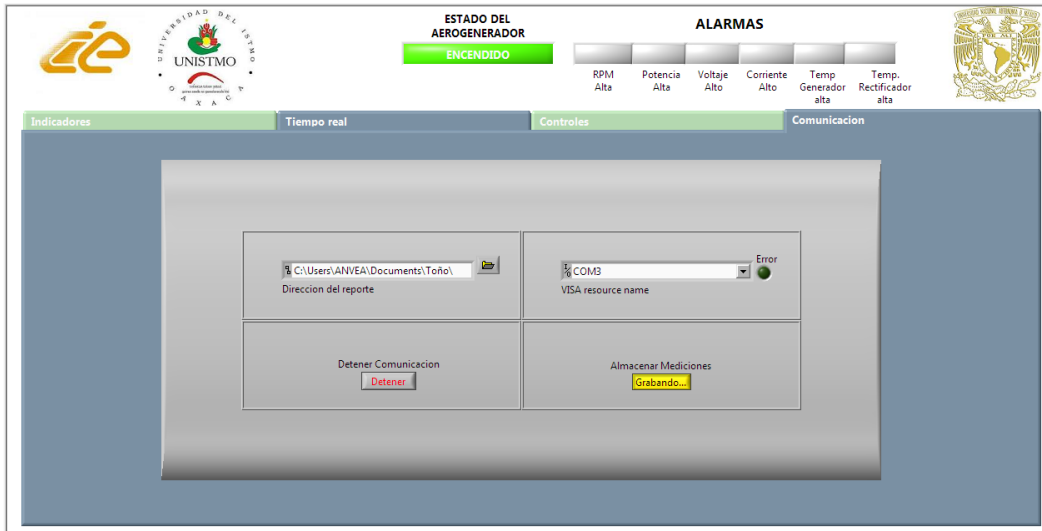


Figura 4-8. Configuración de comunicación en operación.

Los datos almacenados en el reporte que genera el sistema central se describen a continuación.

Para tener una visión del comportamiento del viento y de su efecto en el funcionamiento del aerogenerador, se tomaron datos de la velocidad del viento medidos cada minuto por la estación meteorología DAVIS ubicada en la UNISTMO. Estos datos se encuentran graficados en la Figura 4-9, donde las 0 h representan las 00:00 hrs del día y 24 h las 24:00 hrs del día.

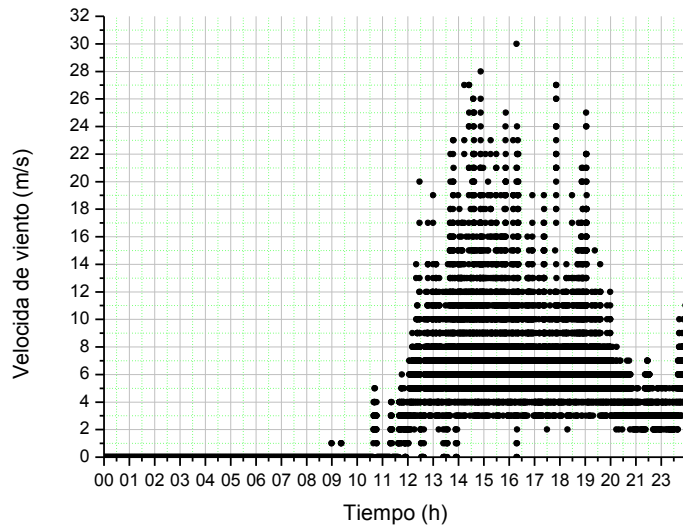


Figura 4-9. Velocidad de viento vs tiempo.

Con los datos de la velocidad del viento graficados en la figura anterior, se realizó un histograma en el cual se observa que la velocidad de viento con mayor frecuencia es de 0 m/s a 1 m/s debido a la ausencia de viento durante las primeras 11 horas del día. Durante las siguientes 13 horas el viento con mayor frecuencia osciló entre 4 m/s y 6 m/s. La velocidad máxima de viento que se registró fue de 30 m/s.

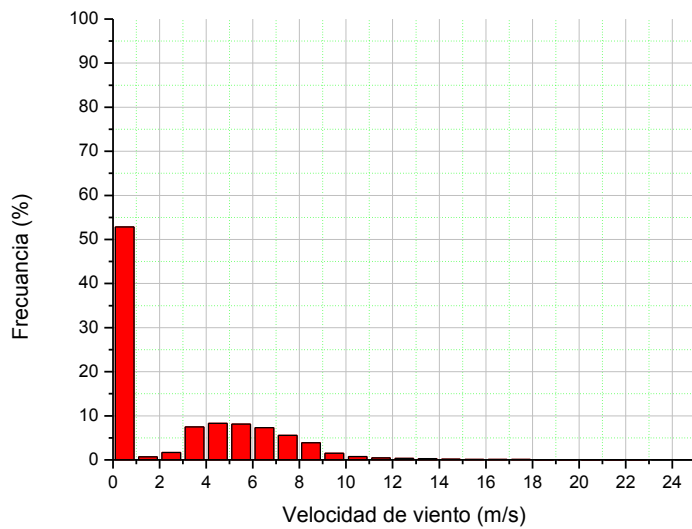


Figura 4-10. Histograma de velocidad de viento.

En la siguiente figura se muestran graficados los datos de potencia. En esta se observa que la generación de electricidad en el aerogenerador se mantuvo de la hora 11 hasta la hora 24.

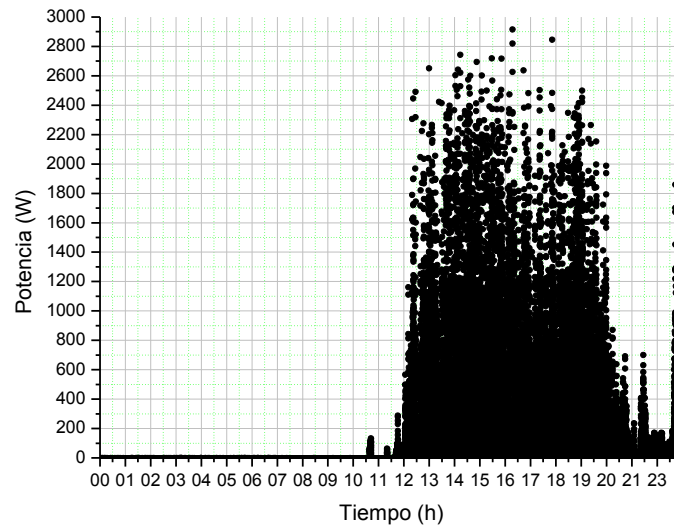
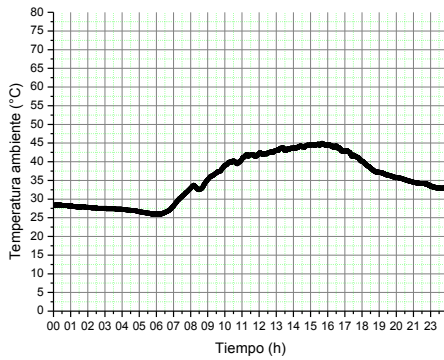


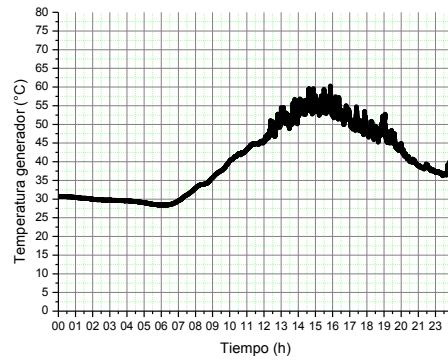
Figura 4-11. Potencia vs tiempo.

Los valores de temperatura registrados durante las 24 horas de evaluación del sistema de control (Figura 4-12) se presentan como: a) temperatura ambiente, b) temperatura del generador eléctrico y c) temperatura del rectificador. Se observa que las últimas dos (b y c) son variables directamente proporcionales a la potencia que genera el aerogenerador.

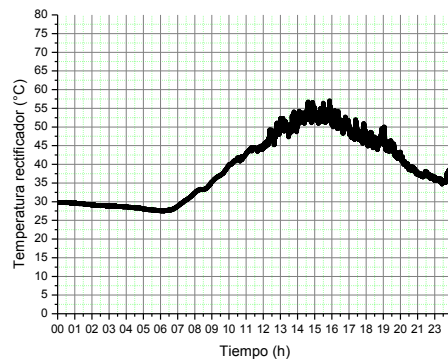
Sin embargo, de la hora 0 a la hora 11 la temperatura registrada por los tres sensores es similar ya que el aerogenerador no genera electricidad debido a la ausencia de viento, situación que cambia a partir de la hora 11 donde se observa un aumento en la temperatura de los sensores del generador eléctrico y el rectificador con respecto al sensor de temperatura ambiente.



a)



b)



c)

Figura 4-12. Gráfica de los datos registrados con los sensores de temperatura, a) ambiente, b) generador y c) rectificador.

En la Tabla 4-1 se presentan los valores máximos, mínimos y promedios registrados con los sensores de temperatura anteriormente descritos, con la finalidad de comprobar que durante la operación del aerogenerador estos dos se mantuvieron dentro de los límites de temperatura de operación recomendados por el fabricante.

Tabla 4-1. Valores máximos, mínimos y promedios registrados de temperatura.

Temperatura	Máxima (°C)	Mínima (°C)	Promedio (°C)
Ambiente	44.9	26	34.9
Generador	60.3	28.4	39.6
Rectificador	57	27.5	38.4

Para verificar el funcionamiento del sistema de regulación de carga electrónica, se presenta la Figura 4-13. En esta se observa que a una velocidad de viento de 0 m/s a 10 m/s la velocidad angular del rotor eólico tiene un comportamiento lineal hasta llegar a los 400 rpm. Cuando la velocidad del viento excede su valor nominal (10 m/s) inicia el funcionamiento del sistema de regulación de carga electrónica para mantener la velocidad angular en un valor aproximado a 400 rpm.

Durante el día de evaluación se presentaron velocidades de viento de hasta 30 m/s y el rotor eólico alcanzó una velocidad angular máxima de 423 rpm.

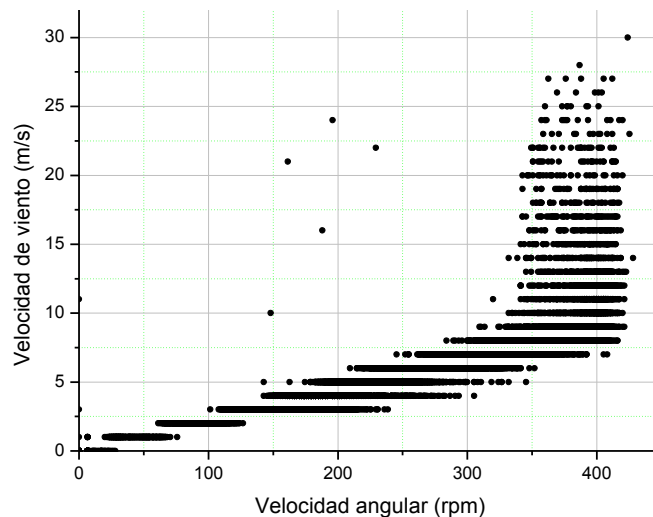


Figura 4-13. Efecto del sistema de regulación de carga.

A partir de los datos registrados con el sensor de velocidad angular del rotor eólico se presentan las siguientes gráficas para visualizar su efecto en la generación de potencia, voltaje, corriente y vibración del aerogenerador.

La potencia que generó el aerogenerador en función de la velocidad angular del rotor eólico se presentan en la Figura 4-14.

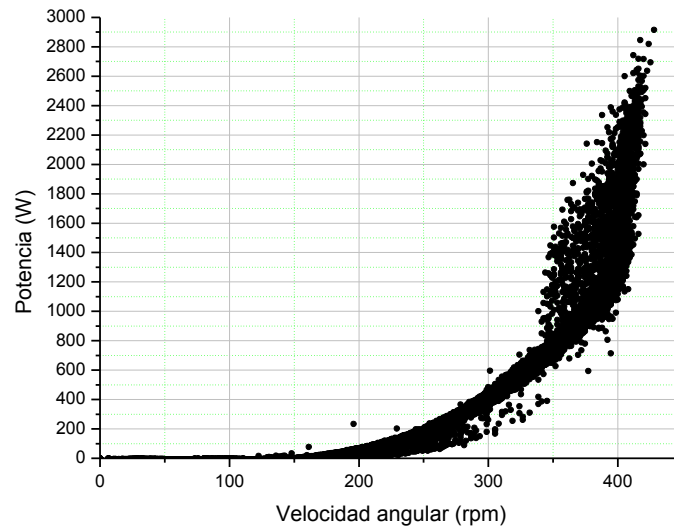


Figura 4-14. Efecto de la velocidad angular del rotor eólico en la generación de potencia.

En la Figura 4-15 se muestra un comparativo de la curva teórica de potencia (Figura 3-1) y la real en función de la velocidad angular del rotor eólico. Se observa que en el punto de diseño nominal (400 rpm) los valores son similares.

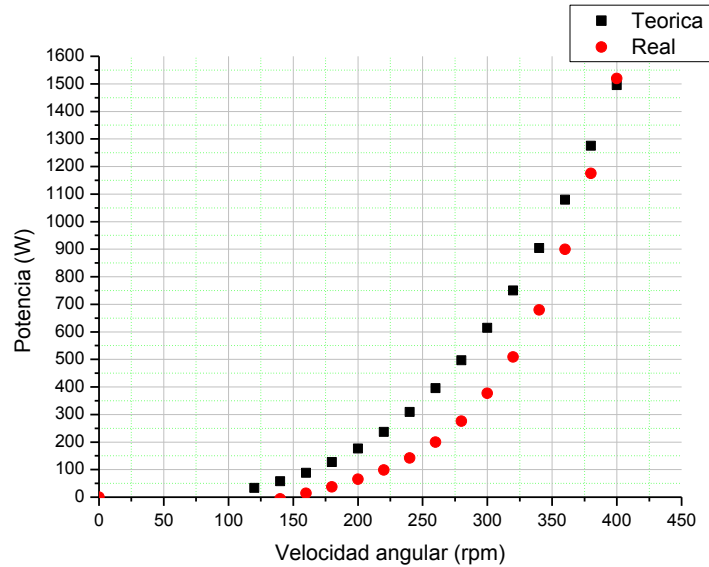


Figura 4-15. Comparativo de la curva teórica de potencia y la real en función de la velocidad angular del rotor eólico.

El voltaje registrado en función de la velocidad angular del rotor eólico se presenta en la Figura 4-16. En esta gráfica se observa que para velocidades angulares del rotor eólico menores a 130 rpm se presenta un comportamiento lineal. También se presentan algunas variaciones debido a que el aerogenerador permanece sin carga de 0 rpm hasta 130 rpm ya que a partir de éste último inicia la generación de energía.

Para velocidades angulares del rotor eólico cercanas a 400 rpm se observa que los valores se desvían de la tendencia lineal. Esto se atribuye al sistema de regulación de carga electrónica que opera para mantener al aerogenerador a una velocidad angular del rotor de 400 rpm (Figura 4-13).

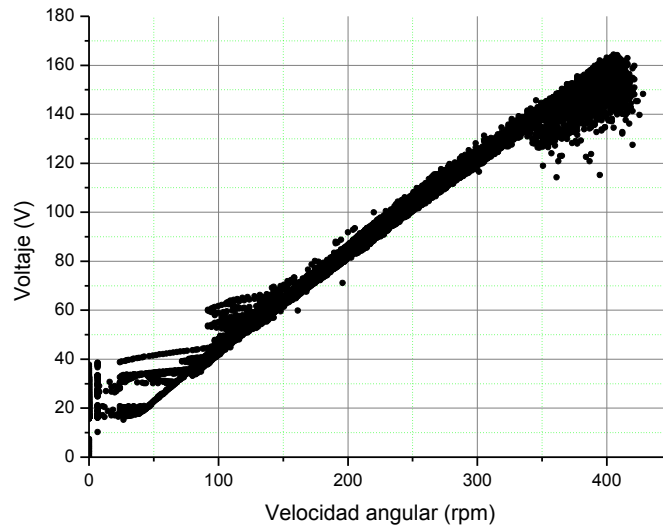


Figura 4-16. Voltaje generado en función de la velocidad angular del rotor eólico.

Los valores registrados con el sensor de corriente en función de la velocidad angular del rotor eólico se encuentran graficados en la Figura 4-17. En esta gráfica se observa la corriente que se inyecta a la red eléctrica a través del inversor y la que se disipa en la resistencia del regulador de carga electrónica para mantener el rotor del aerogenerador a una velocidad constante.

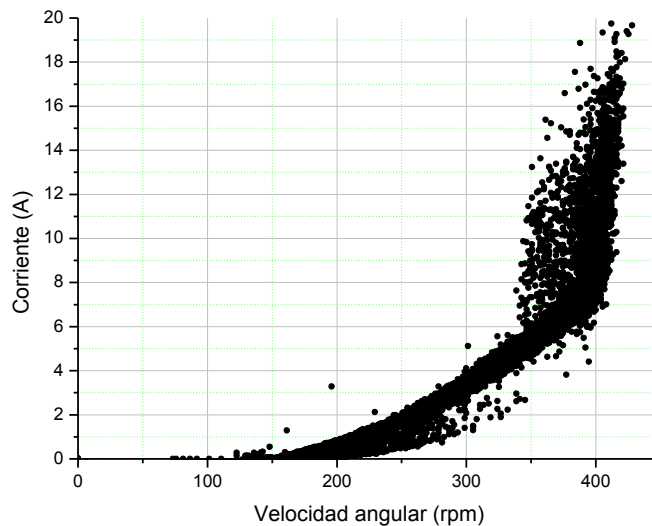


Figura 4-17. Corriente generada en función de la velocidad angular del rotor eólico.

Para visualizar el efecto que tiene la velocidad del viento en la generación de potencia en el aerogenerador en la Figura 4-18 se presenta la gráfica en donde se observa que el inicio de la generación de potencia ocurre a una velocidad de viento de aproximadamente 4 m/s.

También se observa el funcionamiento del sistema de regulación de carga electrónica para valores de velocidad de viento superiores a 10 m/s (nominal).

Dado que no hubo una velocidad de viento sostenida superior a 18 m/s (Tabla 3-1) no se activó el sistema de frenado durante las 24 horas de evaluación del sistema de control.

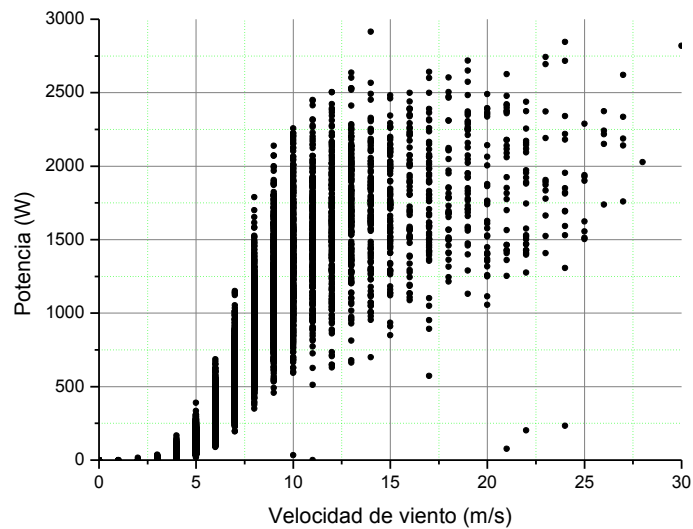


Figura 4-18. Potencia vs velocidad de viento.

El sensor de vibración se evaluó de la hora 14 a la hora 15 en donde se presentó una gran variedad de regímenes de viento. Esto con la finalidad de tener una visión amplia del comportamiento estructural del aerogenerador.

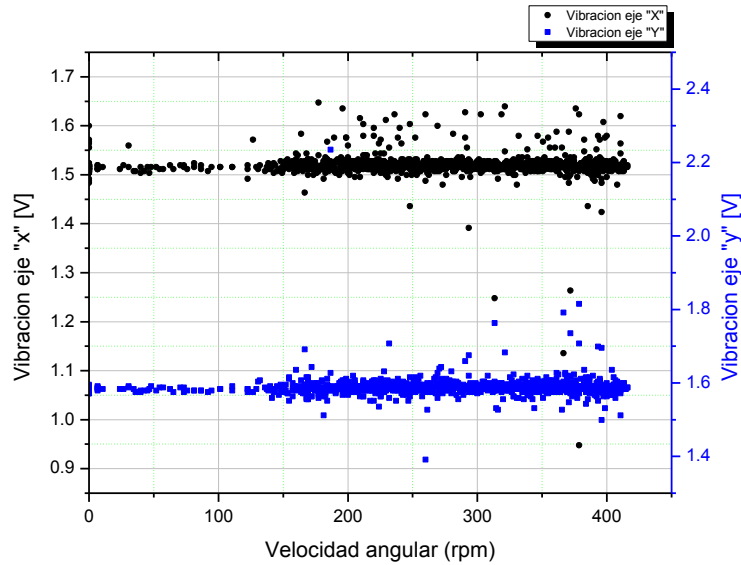


Figura 4-19. Comportamiento estructural del aerogenerador en función de la velocidad angular del rotor eólico.

En la Figura 4-19 se observa cualitativamente el aumento en la vibración en el eje “x” ($\neq 1.52$ V) y el eje “y” ($\neq 1.58$ V) cuando el aerogenerador empieza a generar energía eléctrica a partir de aproximadamente 130 rpm, ya que el desplazamiento es proporcional al voltaje.

Para valores inferiores de 130 rpm en la velocidad angular del rotor eólico el aerogenerador opera sin carga y por tanto no se registran variaciones en el comportamiento estructural.

Capítulo 5. Conclusiones.

El presente trabajo demuestra que se logró el objetivo de diseñar y construir el sistema de control para un aerogenerador de baja potencia. Así mismo a través de éste, se logró el registro y almacenamiento de datos generados por los sensores de voltaje, corriente, temperatura, velocidad angular y vibración.

El presente trabajo también demuestra que la configuración del sistema de control permite la obtención de señales precisas debido a la calibración correcta de los sensores que conforman el sistema de supervisión. Estos datos son recibidos en tiempo real a través del sistema de comunicación que a su vez permite la toma de decisiones e interaccionar en la actividad del aerogenerador a través del sistema central.

El sistema de control presentado cuenta con un diseño que permite la evaluación del aerogenerador de manera segura, ya que cuenta con un sistema de frenado que se activa de forma automática y manual, además, cuenta un sistema de regulación de carga electrónica a través del cual es posible evaluar directamente el rotor y el generador eléctrico bajo diferentes regímenes de viento.

Con los datos obtenidos con el sistema de control durante el día de prueba se comprobó que los parámetros medidos se encuentran dentro de los límites establecidos y por lo tanto el sistema de supervisión y control no envió las señales para la activación del sistema de frenado.

Se comprobó que el sistema de control permite el registro de datos a una distancia de 100 m a través del sistema de comunicación inalámbrica ya que estos datos son transmitidos instantáneamente, lo que permite al usuario recibir y enviar información de forma inmediata.

Todo lo anterior comprueba que el sistema de control es una herramienta útil y eficaz para la evaluación de aerogeneradores de baja potencia. Por lo tanto, se concluye que el sistema de control desarrollado y evaluado en este trabajo contribuye al desarrollo de prototipos de aerogeneradores de baja potencia.

Por último, para trabajos futuros, se propone rediseñar la tarjeta del sistema de supervisión empleando conectores más robustos y con polaridad. Esto con la finalidad de evitar daños en los circuitos y sensores debidos a errores de conexión. También se propone establecer una colaboración con los diseñadores de la góndola para asignar el espacio y la ubicación adecuada de las tarjetas de supervisión y frenado para su fácil acceso en caso de ser requerido.

Bibliografía

1. Amada, J. M. *Introducción al control de aerogeneradores*.
2. Amada, J. M. *Sensores utilizados en energía eólica*. Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Zaragoza.
3. Amenedo, J. L. (2003). *Sistemas eólicos de producción de energía eléctrica*. Rueda.
4. Andrew Kusiak, W. L. (2010). Dynamic control of wind turbines. *Renewable Energy* , 35, 456–463.
5. Areny, R. P. *Sensores y acondicionadores de señal*. Marcombo 4ta edición.
6. *Asociación Mexicana de Energía Eólica*.
7. Baku M. Nagai, K. A. (2009). Performance of a 3 kW wind turbine generator with variable pitch control system. *Applied Energy* , 86, 1774–1782.
8. Cruz, J. S. (2012). *Diseño y construcción de un prototipo de aerogenerador de 1.5 kW para uso en zonas urbanas*.
9. Díez, P. F. *Energía eólica*. Universidad de Cantabria, España.
10. G.M. Joselin Herberta, S. I. (2007). A review of wind energy technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* , 11, 1117–1145.
11. H. Camblong, I. M. (2006). Experimental evaluation of wind turbines maximum power point tracking controllers. *Energy Conversion and Management* , 47, 2846–2858.
12. John K. Kaldellis, D. Z. (2011). The wind energy (r)evolution: A short review of a long history. *Renewable Energy* , 36, 1887-1901.
13. Manwell, J. F. (2002). *Wind energy explained*.
14. Marín, J. P. *Energía eólica en Murcia*. Agencia de Gestión de Energía de la Región de Murcia.
15. Mayné, J. *Sensores, acondicionadores y procesadores de señal*. Silica An Avnet Division.

16. Pernia-Márquez, D. A. (2004). *Introducción a la medición de la vibración*. Venezuela: Universidad de los Andes.
17. *Renewable Energy Policy Network for the 21st Century*.
18. T. K. Barlas, G. A. (2010). Review of state of the art in smart rotor control research for wind turbines. *Progress in Aerospace Sciences* , 46, 1–27.
19. *The World Wind Energy Association, Half-year Report 2012*.
20. Thomas Ackermann, L. S. (2000). Wind energy technology and current status: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* , 4, 315-374.
21. Toledo, A. F. (2007). *Generación eoloeléctrica con almacenamiento de hidrógeno*. Centro de Investigación en Energía.
22. Vielma, M. G. (2011). *Diseño e implementación de un sistema para adquirir las variables energéticas y monitoreo en línea de un sistema híbrido solar-hidrógeno-celda de combustible*. Centro de Investigación en Energía.
23. www.dictuc.cl/metrologia.
24. [www.es.wikipedia.org/wiki/Aerogenerador_\(imagen_Darrieus\)](http://www.es.wikipedia.org/wiki/Aerogenerador_(imagen_Darrieus)).
25. www.es.wikipedia.org/wiki/apmlificador_operacional.
26. www.es.wikipedia.org/wiki/Sistema_de_control.
27. www.promexico.gob.mx.
28. www.windpower.org.