

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA**

**INSTITUTO DE INGENIERÍA**

**MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA**



**“Sistema de control para la levitación de un rotor con electroimanes en un eje vertical”**

**T E S I S**

que presenta para obtener el grado de **MAESTRO EN INGENIERÍA**

**FEDERICO MENDOZA FERNANDEZ**

**DIRECTOR DE TESIS:  
DR. JESUS CEREZO ROMAN**

**CO-DIRECTOR DE TESIS:  
DR. CARLOS VILLA ANGULO**

**MEXICALI, B. C.**

**SEPTIEMBRE DE 2014**

**DEDICATORIA:**

**A DIOS...**

**A MIS PADRES: CARLOS ENRIQUE Y MARTHA...**

**A MIS HERMANOS: CARLOS ENRIQUE, KARLA ERICKA,  
MARTHA ALEJANDRA Y ANGELA...**

**A LAURA...**

## **AGRADECIMIENTOS:**

### **Dr. Jesús Cerezo Román.**

Investigador y director de tesis, por su asesoría y conocimiento para la realización de esta tesis.

### **Dr. Carlos Villa Angulo.**

Investigador y co-director de tesis, por brindarme los conocimientos y el apoyo incondicional para la realización de esta tesis.

### **Dr. Héctor Enrique Campbell.**

Por el apoyo y conocimientos a la realización de este proyecto.

### **Dr. Rogelio Arturo Ramos Irigoyen.**

Por su disponibilidad y soporte de este trabajo.

### **Dr. Alejandro Lambert Arista.**

Por el tiempo, dedicación y apoyo durante el periodo del proyecto.

### **Dr. Nicolás Velázquez Limón.**

Por la motivación y entusiasmo en el tema de energías renovables.

### **A mis amigos y compañeros:**

Mydory Nakasima, Mary Raygoza, Ivette Cota, Erandi Rivera, Halina Meza, Luis González, Pedro Rosales, Edgar González, Jorge Saucedo, Adolfo Ruelas, Ramón Esparza, Alex Pimentel, Darío Huízar, Rene Cárdenas, Víctor Rodríguez, Gabriel Pando, Armando Pérez, Alejandro Suastegui y Rene Delgado.

## RESUMEN

Los aerogeneradores han demostrado ser una de las tecnologías más competentes para la generación de energía eléctrica entre los recursos renovables disponibles hasta ahora, sin embargo se necesitan velocidades de viento mayores de 9 m/s para que puedan trabajar a condiciones nominales. La reducción de la fricción entre el balero y el rotor sería importante para poder activar un aerogenerador a más bajas velocidades de viento e incluso instalarlos en lugares con poca disponibilidad de viento.

En esta tesis se propone diferentes metodologías para el control de la levitación de un objeto. El estudio consiste en la levitación de un cuerpo cilíndrico aplicando 2 metodologías: Lógica Difusa y control PID.

Para la evaluación de la levitación de un objeto, se construyó dispositivo (prototipo 1.0) que consiste en una pieza ferromagnética cilíndrica con dos sensores inductivo con salida analógica, una tarjeta principal y 2 electroimanes y un segundo sistema de prueba fue construido (prototipo 2.0) en el que se agregaron 4 electroimanes .

La plataforma utilizada para ambos sistemas de control fue desarrollada con la instrumentación virtual Labview de National Instruments con una interfaz por medio del microcontrolador Arduino MEGA 2560 con la aplicación de los sistemas de control PID y control por Lógica Difusa para la manipulación de los electroimanes para su levitación de un rotor en un eje vertical.

Los resultados experimentales mostraron que para el prototipo 1.0 se necesitó una fuerza contraria que pudiera entrar para realizar el equilibrio con la fuerza electromagnética que ya se estaba ejerciendo sobre la pieza para poder llevar a cabo la levitación de la misma. En el prototipo 2.0 se realizaron 3 pruebas a diferentes distancias entre el electroimán y la pieza ferromagnética (1 mm, 3 mm y 6mm) dentro del rango de los sensores inductivos. Los resultados obtenidos en las pruebas de 3 mm y 6 mm, los electroimanes necesitaban mayor campo magnético para realizar la levitación y con 1 mm se logró la levitación magnética en un eje vertical pero el tiempo de respuesta no fue el óptimo.

## ABSTRACT

Wind turbine have proven to be one of the most competent for the generation of electricity from renewable resources technologies available so far, however higher wind speed of 9 m/s are needed for them to work at nominal conditions. Reducing friction between the bearing and the rotor would be important to activate a wind turbine at lower wind speeds and even install them in low availability of wind.

In this thesis different methods to control the levitation of an object is proposed. The study consists of a cylindrical body levitation using two technologies Fuzzy Logic and PID control.

For the evaluation of levitation for an object, the test systems (version 1.0) consisting of a ferromagnetic piece with two inductive sensors with analog output, a main card with the power stage and 2 electromagnets. A second test system was built (version 2.0) in which has additionally two electromagnets (4 electromagnets total).

The platform used for both control systems was developed in the virtual instrument software Labview, by National Instruments, with an interface using Arduino MEGA 2560 microcontroller with the implementation of PID control system and fuzzy logic for the levitation of a rotor on a vertical axis using electromagnets.

The experimental trials consisted in two parts: the result of the first part (version 1.0) previously explained was that the opposing forces are needed to perform the levitation of the ferromagnetic piece in one axis with just two electromagnets wasn't enough, so the second part of the experimental trials (version 2.0) was developed with four electromagnet and consisted in 3 tests at different measurement distances (1 mm, 3 mm and 6 mm) within the range of the inductive sensors, as a result in the 3 and 6 mm test the electromagnets require to increase the magnetic field for the levitation success. The result test of 1 mm between the electromagnets and the ferromagnetic piece was that the magnetic levitation was achieved on a vertical axis but the response time was not optimal..

# ÍNDICE DE FIGURAS

## Página

Figura 1.- Fuerza de Coriolis. ....	8
Figura 2.- Rosa de los vientos. ....	10
Figura 3.- Diagrama esquemático de un aerogenerador. ....	13
Figura 4.- Componentes de un aerogenerador de baja capacidad. ....	14
Figura 5.- Anemómetro de cazoletas ....	17
Figura 6.- Veleta desmontada. ....	17
Figura 7.- Diagrama de flujo de componentes para un sistema de control. ....	22
Figura 8.- Estructura de un sistema de baleros magnéticos activos. ....	24
Figura 9.- Esquema de sistema de control en lazo abierto. ....	26
Figura 10.- Esquema de sistema de control realimentado. ....	27
Figura 11.- Esquema del sistema de control proporcional, integral y derivativo (control PID). ....	30
Figura 12.- Ejemplo de subconjuntos borrosos para el conjunto velocidad. ....	32
Figura 13.- Funciones de membresía más comunes para los sistemas de control difuso, Forma triangular. Forma "S", trapezoidal y singleton. ....	33
Figura 14.- Ejemplo de Fuzzificación de una variable. ....	34
Figura 15.- Etapas para la toma de decisión. ....	37
Figura 16.- Vista frontal del prototipo versión 1.0. ....	41
Figura 17.- Magneto solenoide ....	41
Figura 18.- La corriente (I) a través de un núcleo con un hilo como bobina creando un campo magnético (B). ....	42
Figura 19.- Vista de corte transversal del sistema del rotor con el electroimán. ....	42
Figura 20.- Mangas de acero 4140 como pieza ferro magnética, junto con una barra de aluminio. ....	43
Figura 21.- Vista isométrica del prototipo versión 1.0. ....	44
Figura 22.- Vista frontal del prototipo versión 2.0. ....	45
Figura 23.- Vista isométrica del prototipo versión 2.0. ....	45
Figura 24.- Vista de panel frontal del sistema de control PID en Labview. ....	46
Figura 25.- Vista del diagrama de bloques del sistema de control PID en Labview. ....	47
Figura 26.- Izquierda, a).- Panel Frontal. Derecha, b).- Diagrama de bloques. ....	48
Figura 27.- Gráfica en el panel frontal de la variable de proceso y punto de referencia. ....	48
Figura 28.- Vista del panel frontal del sistema de control de lógica difusa. ....	49
Figura 29.- Vista del diagrama de bloques del sistema de control de lógica difusa. ....	50
Figura 30.- Diagrama de instrumentación. ....	51
Figura 31.- Microcontrolador Arduino MEGA 2560. ....	51
Figura 32.- Vista de corte transversal del rotor del aerogenerador en su etapa de experimentación. ....	53
Figura 33.- Sensor inductivo con salida analógica, marca sensorpart, modelo IS 512-02 Al. ....	55
Figura 34.- Curva característica de salida con voltaje de los sensores inductivos con salida analógica 1 y 2. ....	55

Figura 35.- Tarjeta principal: etapa de potencia, fuente de poder, conexión de sensores y electroimanes.....	57
Figura 36.- Diagrama Unifilar de Etapa de Potencia .....	58
Figura 37.- Vista interna de un optoacoplador. ....	59
Figura 38.- Optoacoplador: a) Encapsulado típico, b) Esquema eléctrico. ....	60
Figura 39.- Transistor 2N5302G, NPN de alta potencia. ....	60
Figura 40.- Distancia $x_0$ de 1 mm, 3 mm y 6 mm del rotor con el magneto solenoide eléctrico.....	61
Figura 41.- Medidor de campos eléctricos: 8 GHz EMF meter.....	62
Figura 42.- Variables de entrada/salida en el Sistema de Diseño de Lógica Difusa.....	65
Figura 43.- Variable de entrada/salida: Funciones de membresía con rango, puntos e intervalos, tipo de forma de gráfica.....	66
Figura 44.- Reglas de Mamdani.....	68
Figura 45.-Pantalla del sistema de prueba con gráfica de la relación de entrada/salida/.....	69
Figura 46.- Grafica en tres dimensiones con la relación entrada/salida.....	70

# ÍNDICE DE TABLAS

## Página

Tabla 1.- Proyectos de Energía Eólica en desarrollo y a futuro.....	1
Tabla 2.- Proyectos relacionados con sistemas de levitación magnética. ....	5
Tabla 3.- Contenido en porcentaje de cada elemento que conforman al Acero 4140. ....	43
Tabla 4. Especificaciones del microcontrolador Arduino MEGA 2560.....	52
Tabla 5.- Tabla de caracterización de sensores, distancia contra voltaje. Izquierda (a) sensor 1. Derecha (b) sensor 2. ....	56
Tabla 6.- Mediciones de los parámetros de salida: campo eléctrico, campo magnético y densidad de potencia de los magnetos solenoides eléctricos.....	62
Tabla 7.- Tabla de transición del sistema de control como técnica de sintonización. ....	63
Tabla 8.- Funciones de membresía de entrada/salida con sus intervalos correspondientes. ....	67

## NOMENCLATURA

$P$	-	Potencia [w].
$\rho$	-	Densidad del aire [kg/m <sup>3</sup> ].
$A$	-	Área de barrido [m <sup>2</sup> ].
$v$	-	Velocidad del aire [m/s].
$W_{elec}$	-	Potencia real [w].
$W_{max}$	-	Potencia máxima [w].
$n_{aerogenerador}$	-	Eficiencia del aerogenerador.
$x1, x2$	-	Posición [mm].
$y1, y2$	-	Posición [mm].
$e(t)$	-	Señal de error.
$u(t)$	-	Señal de control.
$u_0$	-	Señal de control en estado estacionario en error cero.
$K_c$	-	Ganancia de control proporcional.
$K_i$	-	Ganancia de control integral.
$K_d$	-	Ganancia de control derivativo.
$\tau$	-	Constante de tiempo.
$\mu_{Baja}(x)$	-	Subconjunto baja, ( <i>Lógica Difusa</i> ).
$\mu_{Media}(x)$	-	Subconjunto media, ( <i>Lógica Difusa</i> ).
$\mu_{Alta}(x)$	-	Subconjunto alta, ( <i>Lógica Difusa</i> ).
SISO	-	Entrada Simple, Salida Simple (Single Input, Single Output).
MIMO	-	Entrada Multiple, Salida Multiple (Multiple Inputs, Multiple Outputs).
$B$	-	Campo magnético [mA/m].
$q$	-	Carga eléctrica [C].
$F_B$	-	Magnitud de la fuerza magnética.
$dP/dv$	-	Densidad de potencia [ $\mu w/cm^2$ ].
$E$	-	Campo eléctrico [ $v/m$ ].

# ÍNDICE

	<u>Página</u>
Resumen.....	iii
Abstract.....	iv
Índice de figuras.....	v
Índice de tablas.....	vi
Nomenclatura.....	vii
<b>1. Introducción: Panorama general.....</b>	<b>1</b>
1.1.Problemática y justificación.....	2
1.2.Antecedentes.....	3
1.3.Objetivos.....	6
1.3.1.Objetivo general.....	6
1.3.2.Objetivos específicos.....	6
<b>2. Generalidades.....</b>	<b>7</b>
2.1.Fundamentos de la energía eólica.....	10
2.2.Aerogeneradores de baja capacidad.....	12
2.3.Medición del viento.....	15
2.4.Control en diferentes aerogeneradores.....	18
2.5.Sistemas de control en aerogeneradores de baja capacidad.....	20
<b>3. Estudio teórico por medio de la simulación del sistema de control.....</b>	<b>23</b>
3.1.Descripción del sistema convencional.....	24
3.2.Estudio de diferentes estrategias de control.....	26
3.2.1 Control PID.....	28
3.2.2 Control por Lógica Difusa.....	31
3.3.Comparación de las diferentes estrategias de control.....	38
<b>4. Construcción de sistema experimental de control en un eje vertical... 40</b>	
4.1.Descripción del sistema propuesto.....	40
4.1.1 Prototipo Versión 1.0.....	41
4.1.2 Prototipo Versión 2.0.....	44
4.2.Diseño y construcción del sistema de control de electroimanes para la levitación magnética.....	46
4.2.1 Sistema de control: Control PID.....	46
4.2.2 Sistema de control: Lógica Difusa.....	49
4.3.Instrumentación del prototipo experimental.....	51
4.3.1 Interfaz de control.....	51
4.3.2 Interfaz de control gráfica.....	52
4.3.3 Sensores.....	53
4.4.Etapa de potencia.....	57

## CONTINUACION ÍNDICE

	<u>Página</u>
<b>5. Estudio experimental.....</b>	<b>61</b>
5.1.Sistema de control de electroimanes para la levitación magnética.....	61
5.2.Procesamiento y análisis de la información.....	69
<b>6. Conclusiones.....</b>	<b>71</b>
6.1.Conclusiones.....	71
6.2.Recomendaciones.....	72
6.3.Trabajos futuros.....	73
<b>Referencias.....</b>	<b>74</b>
<b>Anexo A.....</b>	<b>76</b>
<b>Anexo B.....</b>	<b>78</b>
<b>Anexo C.....</b>	<b>79</b>
<b>Anexo D.....</b>	<b>80</b>





## ***CAPÍTULO 1.- Introducción.- Panorama general***

La energía eólica es de las energías renovables más limpias que existe, el aprovechamiento de la energía eólica tiene grandes ventajas: la ausencia de emisiones atmosféricas directas, no involucra sustancias peligrosas, no produce en general contaminación alguna (agua, aire y suelo), por estas razones, la energía eólica es considerada como “Energía Verde”.

El fin de utilizar la energía eólica (una de las energías renovables de mayor sustentabilidad a pesar de su aleatoriedad) es el aprovechamiento de la energía que poseen las masas de aire en movimiento por medio de aerogeneradores. Las formas de utilización y la tecnología aplicada son las que han ido cambiando a lo largo del tiempo, pero su finalidad es el aprovechamiento de un recurso energético que la naturaleza ofrece completamente gratuita, un claro ejemplo es la electricidad generada en la Rumorosa que sirve para subsidiar el consumo de energía eléctrica de alrededor del 70% del alumbrado público de la ciudad de Mexicali, así como también ayuda a una parte de la población en sus consumos eléctricos por medio de una tarjeta electrónica.

### *Proyectos Eólicos Potenciales en Baja California:*

Las mejores zonas de potencial eólico se encuentran en la sierra de La Rumorosa contando con 1,260 MW para dichos proyectos eólicos que ya están trabajando en la actualidad más los proyectos aún sin fecha no determinada (N.D.) de entrada en operación. (Ver Tabla 1). (Campbell, 2012).

**Tabla 1.- Proyectos de Energía Eólica en desarrollo y a futuro.**

<b>Proyecto</b>	<b>Desarrollador</b>	<b>Modalidad</b>	<b>MW</b>	<b>Fecha estimada de entrada en operación</b>
<b>Fuerza Eólica de Baja California</b>	Fuerza Eólica	Exportación	300	N.D.
<b>México Wind</b>	Union Fenosa/Geobat	Exportación	500	N.D.
<b>ND</b>	Cannon Power	Exportación	200	N.D.
<b>Baja Wind</b>	Sempre Energy	Exportación	250	2011
<b>Baja California</b>	Fuerza Eólica	Auto abasto	10	N.D.

**(Fuente: Programa Especial para el Aprovechamiento de Energías).**

La definición de un aerogenerador de pequeña capacidad según la World Wind Energy Association (WWEA, 2014) describe que son aerogeneradores con un rango de capacidad entre 6 Watt a 300 kW debido a la práctica casual de las industrias que ellas mismas han creado.

La capacidad instalada de energía eólica para finales del 2009 podrá, en un año de viento normal, producir el 4.8% de la electricidad en Estados Unidos. Más de 10 GW de capacidad de energía eólica fue instalada en el 2009, que equivale a 23% más que en el 2008, (EWEA, 2013).

### ***1.1.- Problemática y justificación.***

La energía eólica tiene un alto valor de beneficio debido a que disminuye el agotamiento de los combustibles fósiles, que se caracterizan por estar disponibles en una cantidad limitada, esto es que por cada kWh de electricidad producido en un parque eólico se evita la generación de una unidad de electricidad que podría haber procedido de una central convencional. Por lo tanto, las empresas mexicanas están dirigiendo sus miradas a la energía eólica como una opción factible para abastecer sus necesidades eléctricas, tanto es así que podemos tener notas favorables como las siguientes:

- *La empresa Bimbo de México produce su energía a partir de Energía Eólica, con una inversión total de 200 millones de dólares, 65 instalaciones de Grupo Bimbo contarán con 90 MW de capacidad instalada de energía eólica, bajo la modalidad de autoabastecimiento, con la entrada en operación del parque eoloeléctrico Piedra Larga, ubicado en Unión Hidalgo, Oaxaca. El parque producirá 333 GW/h anuales a partir de 45 aerogeneradores de 2 MW cada uno. (CNN, 2012).*
- *La empresa Soriana invierte en Energía Eólica, con una inversión de entre 100 y 120 millones de dólares, la planta localizada en Tamaulipas abastecerá de energía a 120 tiendas de la región norte del país. La idea es iniciar la construcción de los parques eólicos en el primer trimestre del año 2013, con una inversión similar por cada una de las 5 instalaciones eólicas. (Reforma, 2012).*

La compatibilidad entre la instalación de turbinas eólicas y el respeto por el medio ambiente parece ser aceptada por la sociedad actual, existen impactos mínimos derivados del aprovechamiento de la energía eólica que no deben ser obviados, pero esto es debido al esfuerzo por reducir la contaminación del medio ambiente por la generación de energía eléctrica.

Debido al incremento en la demanda de energía, la tecnología en los aerogeneradores ha ido mejorando conforme va pasando el tiempo, cada vez existen aerogeneradores con mayor eficiencia, sin embargo el problema reside en la velocidad de viento y esto hace más complicado el vencer el torque inicial para la generación eléctrica. Por otra parte, el hecho de no tener contacto o fricción del rotor con los baleros mecánicos ofrecería muchas ventajas tales como: operación de un rotor sin fricción, baja vibración en el mecanismo, alta velocidad rotacional, poco mantenimiento y gran utilidad en ambientes a altas temperaturas. En el Instituto de Ingeniería se está desarrollando un aerogenerador de baja capacidad con levitación magnética y de ahí se forma parte del estudio, diseño, simulación y construcción de un sistema de control para un aerogenerador con levitación magnética a base de baleros magnéticos para darnos la facilidad de poder manipular y controlar este fenómeno: sin fricción.

## ***1.2.- Antecedentes.***

El primer aerogenerador fue construido en Francia, en 1929, pero se rompió a causa de una violenta tormenta. En Rusia se puso en funcionamiento en 1931, en Crimea, frente al mar Negro, un aerogenerador de 30 metros, que tenía que proporcionar 100 kW a la red de Sebastopol, la generación eléctrica media durante dos años fue de 32 kW.

En 1941 los estadounidenses, y más concretamente la NASA, se construyó un aerogenerador tipo “bipala” de 53 m de diámetro, previsto para una potencia máxima de 1,250 kW que se instaló en Vermont.

En Alemania se construyó entre 1955 y 1957 un aerogenerador de dos palas de 34 metros de diámetro, de fibra de vidrio, a 80 Km al este de Stuttgart, así como Dinamarca construyó en 1957 el hélice de 3 palas de 24 metros de diámetro que funciono hasta 1968 y

producía 200 kW con una velocidad del viento en el eje de la máquina de 15m/s. (Navales, 2008).

Actualmente, la energía eólica es la fuente de energía de mayor crecimiento porcentual del mundo, simplemente en Europa se acumulan las tres cuartas partes de la generación eólica mundial y la suma de Europa con Estados Unidos de América cuentan con más del 90% mundial.

En la Universidad Nacional de Quilmes, Diego Palmieri y Ariel Pucci Martín, construyeron de un sistema de levitación magnética para laboratorio controlado por una computadora en tiempo real, con este sistema se logró controlar la corriente de una bobina, encargada de producir el campo magnético necesario para la levitación de un cilindro metálico. (Palmieri, 2000).

Para el año 2001, A. E. Hartavi y compañía, en la Universidad Técnica de Estambul en Turquía, realizaron un estudio experimental con baleros magnéticos activos, en dicho estudio menciona la utilización de una computadora como sistema de procesamiento de datos el cual tiene un sistema de control PD para satisfacer los cambios bruscos de movimiento en el rotor estudiado. Hubo una buena respuesta entre la simulación y la teoría indicando que el modelado del sistema es adecuado, además se obtuvo una suspensión estable del rotor estudiado. (Hartavi, 2001).

En el año 2002, Florian Lösch del Instituto de Tecnológica Federal de Suiza, propuso en su tesis doctoral diversos puntos a considerar para el control de rotores horizontales, entre ellos: el peso del rotor como dato inicial, debido a que conlleva a una corriente inicial distinta que es el caso contrario para un rotor vertical. (Lösch, 2002)

En el año 2009, en la Universidad de Tecnología Wuhan en China, Huachun Wu, junto con sus colegas técnicos de la misma universidad desarrollaron de manera experimental un aerogenerador de baja capacidad con baleros magnéticos híbrido, en el cual colocaron 2 baleros magnéticos permanentes radiales y un balero magnético activo axial en la parte posterior. En los resultados se realizó un análisis de FEM para determinar los parámetros geométricos óptimos de los baleros, además utilizaron un sistema de algoritmos de control PID para resolver la estabilidad en el rotor. (Wu H. , 2009). Un año

después (2010), los mismos autores realizaron un estudio de un aerogenerador con levitación magnética de tipo vertical, con un sistema de algoritmos de control PID similar al trabajo anterior realizado. En sus conclusiones mencionan que el equipo trabajó en forma estable y el amortiguamiento que se presentaba en pruebas preliminares en la simulación era óptimo. (Wu H. , 2010).

Los proyectos relacionados con sistemas de levitación magnética más importantes en los últimos 20 años, pero solo los más relevantes son mostrados debido a su potencial ayuda para el estudio y escritura de esta tesis, (*ver tabla 2*).

**Tabla 2.- Proyectos relacionados con sistemas de levitación magnética.**

AÑO	TEMA	AUTOR	ESTRATEGIA
1990	Diseño y control de un sistema de balero magnético activo para rotación de alta velocidad	René Larssonneur	-
1995	Sistema de control de balero magnético con auto sentido usando aproximación geométrica	T. Mizuno et al.	Aproximación geométrica
1996	Sistema de levitación magnética controlado con lógica difusa y control clásico	Ubaldo Espinosa et al.	Lógica difusa
1998	Diseño y modelado de un micro-balero magnético permanente	V. Fernández et al.	-
2000	Construcción de un sistema de levitación magnética para laboratorio controlado por pc en tiempo real	Diego Palmieri	PI y PID
2000	Aerogenerador permanente "MagLev"	Zhao Ke	-
2001	Diseño, simulación y estudio experimental del balero magnético activo	A. E. Hartavi et al.	PD
2002	Identificación y diseño de control automatizado para sistemas de baleros magnéticos activos	Florian Lösch	-
2005	Diseño y control de sistemas de baleros magnéticos activos con fuerza tipo Lorentz con actuador axial	Ha-Yong Kim et al.	Algoritmos
2007	Modelado de un sistema de baleros magnéticos activos horizontales con forma de incertidumbre determinístico	Abdul Rashid Husain et al.	-
2008	Sistema de control de levitación magnética en educación en Ingeniería	Milica B. Naumovic et al.	PD
2008	Dispositivo de balero magnético y metodología de operación	Toshiya Yoshida	PWM
2009	Interferencia electromagnética en turbinas de alta capacidad	Florian Krug et al.	-
2009	Control de un sistema de levitación magnética con compensación de redes neuronales	Francisco Panuncio	Redes neuronales
2009	Desarrollo de un aerogenerador de baja capacidad basado en baleros magnéticos híbridos	Huachun Wu et al.	PID
2010	Estudio en levitación magnética de un aerogenerador de tipo vertical y baja velocidad de viento	Huachun Wu et al.	PID

### ***1.3.- Objetivo General:***

Estudio, diseño y construcción de un sistema de control para la levitación de un rotor con electroimanes en un eje vertical.

#### ***1.3.1- Objetivos Específicos:***

- Aplicación de los sistemas de control PID y control por Lógica Difusa para la manipulación de electroimanes por medio de la plataforma para desarrollo de instrumentación virtual Labview (NI, 2014) con una interfaz por medio del microcontrolador Arduino MEGA 2560.
- Comparación entre los sistemas de control PID y control por Lógica Difusa en un prototipo experimental para la levitación de un cuerpo con electroimanes.
- Elaboración de la etapa de potencia para la aplicación de ambos sistemas de control (PID y Lógica Difusa).

## ***CAPÍTULO 2.- Generalidades: El viento.***

La energía disponible en el viento varia con respecto a la velocidad del mismo, entonces si podemos entender las características del recurso del aire para su explotación se podrán saber todos los aspectos críticos, desde la identificación de sitios y localizaciones, como también las predicciones de la variabilidad económica de granjas eólicas hasta inclusive el mismo diseño de aerogeneradores.

La definición del diccionario de la Real Academia de la Lengua Española define como viento a la corriente de aire producida en la atmosfera por causas naturales (RAE, 2014), otra definición señala: viento, es el movimiento de masas de aire en la atmosfera a gran escala. Estos movimientos de aire se crean a escala global, principalmente, como consecuencia del calentamiento desigual de la superficie terrestre. Por lo tanto, la energía eólica puede considerarse como una forma indirecta de energía solar. (Navales, 2008)

Desde el punto de vista como recurso energético eólico, la característica más crítica del viento es su variabilidad. El viento es sumamente variable, tanto geográficamente como temporalmente, además esta variabilidad persiste sobre una amplia variedad y rango de escalas, tanto en espacio como en tiempo.

### *Origen del Viento*

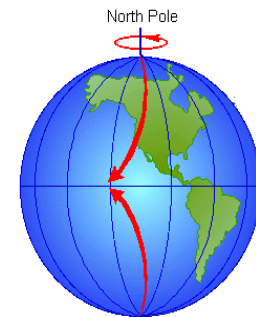
El aire cálido del ecuador asciende y tiende a desplazarse en dirección hacia los polos, lo que genera zonas de baja presión. Pero al ascender el aire se enfría y desciende hacia el trópico, produciendo zonas de altas presiones. Al alcanzar la zona subtropical desciende y genera zonas de baja presión. Así, el aire frío que desciende choca con el aire cálido y produce bajas presiones, repitiéndose continuamente este efecto. Esos cambios de temperatura dan lugar a la generación de los vientos. El movimiento del aire es inagotable, pero su presencia es dispersa y aleatoria por lo que se desplaza de un lugar a otro con velocidades diferentes.

Las áreas del globo donde el aire desciende son zonas de alta presión, y donde el aire es ascendente se forman zonas de baja presión. Este gradiente horizontal de presiones

conduce el flujo de aire desde las altas a las bajas presiones, lo que determina la velocidad y dirección inicial del movimiento del aire. Al describir la dirección del viento, siempre se indica de donde parte. Es decir, un viento del norte va en dirección desde el norte hacia el sur.

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

La fuerza de Coriolis es debida a la rotación de la tierra. Desde un punto fijo en el espacio, el aire parecería viajar en una línea recta, pero para un punto sobre la tierra su trayectoria parece curva. (Ver figura 1). Por lo tanto, la fuerza de Coriolis simplemente se ve desde un marco de referencia que gira.



**Figura 1.- Fuerza de Coriolis.**

Además de esta circulación global del viento, hay una multitud de efectos locales. Los diferentes calentamientos de la tierra y el mar también producen cambios en el flujo del viento general. Algunos ejemplos de estas características locales pueden ser:

- La brisa marina: Al calentarse la tierra más que el mar, durante el día sopla viento del mar hacia la tierra. Igualmente, por la noche, al enfriarse más rápidamente la tierra, sopla de la tierra hacia el mar.
- Corrientes valle-montaña: es la distinta insolación que reciben los distintos lados del valle o en montaña.
- Encauzamiento: es la aceleración que sufre el viento al entrar entre dos obstáculos.

Así, el conocimiento del viento de la zona en la que se realizaría la instalación de un aerogenerador nos proporcionará la información necesaria para calcular su emplazamiento y la estimación de la producción de energía, el diseño de estos parámetros está en función de las condiciones extremas y medias del mismo, a su vez, tenemos que contemplar las disposiciones de espacio/terreno de los recursos materiales o la facilidad de transportar la energía eléctrica transformada por un aerogenerador.

#### Características básicas del viento.

El viento se define por dos características básicas que tienen relación directa en el entorno de los aerogeneradores: velocidad y dirección. Para poder medir la velocidad existe un instrumento llamado anemómetro, para conocer la dirección del mismo el instrumento es la veleta (*ver Tema 2.3: Medición del viento*), estos mismos vientos pueden tener tres condiciones a efectos de aplicación:

- Viento instantáneo: Corresponde a la velocidad en un instante determinado.
- Viento medio aeronáutico: Es el valor de la velocidad mantenida durante dos minutos.
- Viento medio meteorológico: Es el valor de la velocidad mantenida durante diez minutos.

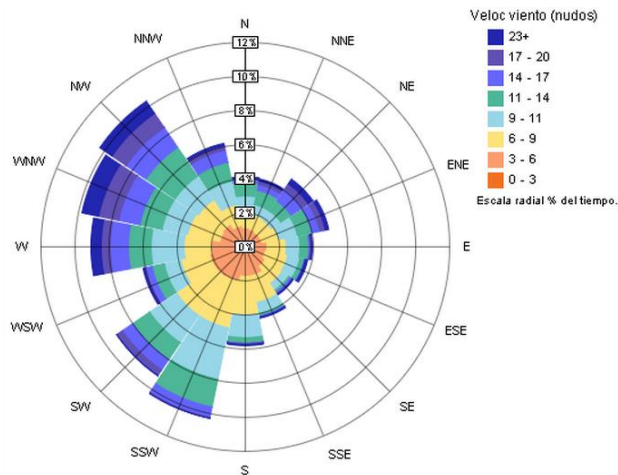
#### Cuantificación de la velocidad del viento.

La velocidad del viento es el parámetro que determina la viabilidad de las instalaciones eólicas. Su valor puede ser indicado numéricamente en m/s, km/h, millas/s, millas/h, etcétera, esto dependerá del método numérico o sistema de medición que se esté manejando. Mientras se pueda medir y obtener una cuantificación del viento, se puede dividir la localidad, región o país en zonas. Un claro ejemplo de esto es España que fue dividido en 5 zonas dependiendo de las horas al año que exista viento en dicha zona.

- ZONA A: Vientos durante al menos 5,250 horas al año.
- ZONA B: Vientos durante 4,380 – 5,250 horas al año.
- ZONA C: Vientos durante 3,500 – 4,380 horas al año.
- ZONA D: Vientos durante 2,600 – 3,500 horas al año.
- ZONA E: Zona de reducido aprovechamiento industrial: 1,750 – 2,600 horas al año.

### Dirección y Orientación.

Al hablar de dirección y orientación del viento tenemos que tener en mente la “Rosa de los vientos” (ver figura 2), es un diagrama circular que tiene marcados alrededor los rumbos en que se divide la circunferencia del horizonte y representa la intensidad media del viento, dirección y orientación en diferentes sectores en los que divide el círculo del horizonte. Puede contener solo cuatro orientaciones que son las correspondientes a los puntos cardinales (N, S, E y O), así como ampliarse con divisiones de estos mismos en 45° con sus nombres correspondientes que son (NE, SE, SO y NO) e inclusive en divisiones de 11.25° para tener mayor precisión (NNE, ENE, ESE, SSE, SSO, OSO, ONO, NNO). En la figura 2, muestra el viento predominante de más de 23 nudos en dirección noroeste con más de 10% del tiempo.



**Figura 2.- Rosa de los vientos.  
(Fuente: Autodesk Revit)**

## ***2.1.- Fundamentos de la energía eólica.***

Para evaluar la viabilidad del uso del viento como fuente de energía, es necesario conocer las características del mismo.

La energía puede existir en numerosas formas: térmica, mecánica, cinética, potencial, entre otras. La única forma de energía mecánica que posee el viento y que puede convertirse por completo en trabajo es la energía cinética.

La energía cinética de un cuerpo es aquella energía que posee debido a su movimiento y se define como el trabajo necesario para acelerar un cuerpo de una masa determinada desde el reposo hasta la velocidad indicada, (Manwell, 2002).

La potencia máxima está dada por:

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \text{----- [Ec. 01]}$$

dónde:

$P$  =Potencia [w].

$\rho$  = Densidad del aire [kg/m<sup>3</sup>].

$A$  =Area del rotor [m<sup>2</sup>].

$v$  =Velocidad del aire [m/s].

Hay que considerar que:

1. La densidad de potencia del viento es proporcional a la densidad del aire. Para condiciones estándar (Temperatura ambiente 25°C) la densidad del aire es 1.18 kg/m<sup>3</sup>.
2. La energía del viento es proporcional al área de barrido por el rotor (o el diámetro al cuadrado de una máquina de viento convencional de eje horizontal).
3. La densidad de potencia del viento es proporcional a la tercera potencia de la velocidad del viento.

### Límite de Betz

El límite de Betz es un modelo para determinar la potencia del rotor ideal, es atribuido por Albert Betz (1926), así como el empuje del viento y el efecto de la operación del rotor en campo local del viento. El límite de Betz se deriva de los principios de la conservación de la masa y el momento del flujo de aire a través de un disco actuador (área de barrido) que extrae la energía del flujo de aire. De acuerdo con el límite de Betz, ningún aerogenerador puede capturar más del 59.3% de la energía cinética del viento.

Para determinar la potencia eléctrica de un aerogenerador se tiene que considerar la eficiencia de este mismo, para tales casos, se emplea la Ec. 02 y contempla la potencia real del aerogenerador es directamente proporcional con respecto a la potencia máxima por la

eficiencia del aerogenerador, la eficiencia de las aerogeneradores reales es alrededor del 30%.

$$W_{elec} = (W_{max})(n_{aerogenerador}) \text{ ----- [Ec. 02]}$$

donde:

$W_{elec}$  = Potencia real

$W_{max}$  = Potencia máxima

$n_{aerogenerador}$  = Eficiencia del aerogenerador

## **2.2.- Aerogeneradores de baja capacidad.**

El estándar de seguridad para aerogeneradores de baja capacidad que proviene de la Comisión Internacional Electrotécnica (siglas en inglés: (IEC, 2014)), IEC 61400-2, define a un aerogenerador de baja capacidad como a un rotor con área de barrido menor de 200 m<sup>2</sup>, correspondiente aproximadamente a 50 kW. La operación principal básica es la misma para cualquier aerogenerador de cualquier tamaño. Por ejemplo, la restricción de la potencia de salida dada por el límite de Betz (*ver Tema 2.1.- Fundamentos de la Energía Eólica*) es independiente al tamaño del aerogenerador. Pero hay parámetros que si cambian dependiendo del tipo de aerogenerador como es la velocidad de arranque y la velocidad de corte o paro, esto es importante debido a lo siguiente:

- Los aerogeneradores de baja capacidad generalmente están localizados en partes donde no es necesario grandes capacidades de energía eléctrica por el usuario, por lo tanto, es un área donde no hay corrientes de viento mayores a 7 m/s, sin descartar las ráfagas de viento alto de forma periódica.
- El generador eléctrico del aerogenerador de baja capacidad tienen un torque resistivo grande haciendo que las velocidades de viento tengan que ser consideradas debido a su inicio de giro para los alabes.
- Los aerogeneradores de baja capacidad por lo general, tienen un sistema de frenado como medida de protección para velocidades altas.

### Funcionamiento de un aerogenerador de alta capacidad

El viento incide sobre el rotor (punto A) del aerogenerador para así poder activarlo, por consiguiente, las alabes de los aerogeneradores tienen una fuerza en la superficie de sustentación y arrastre donde el propósito es de producir un movimiento (punto B) y comenzar la rotación de las mismas, las alabes son los que generan una fuerza de torque en el eje del generador (punto C). La caja de engranes (punto D) se encarga de multiplicar la rotación de la flecha o eje. Para un flujo estable, el producto de este torque y la velocidad angular del alabe, nos genera la potencia extraída del viento por medio del generador eléctrico (punto G), (ver figura 3).

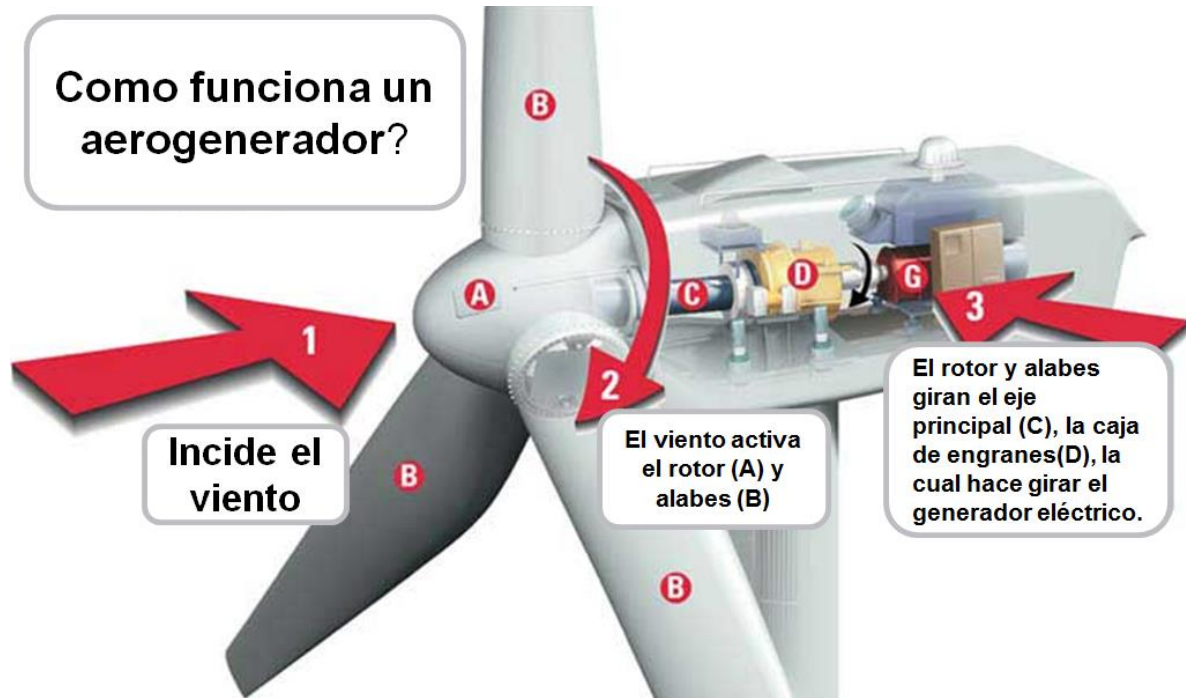
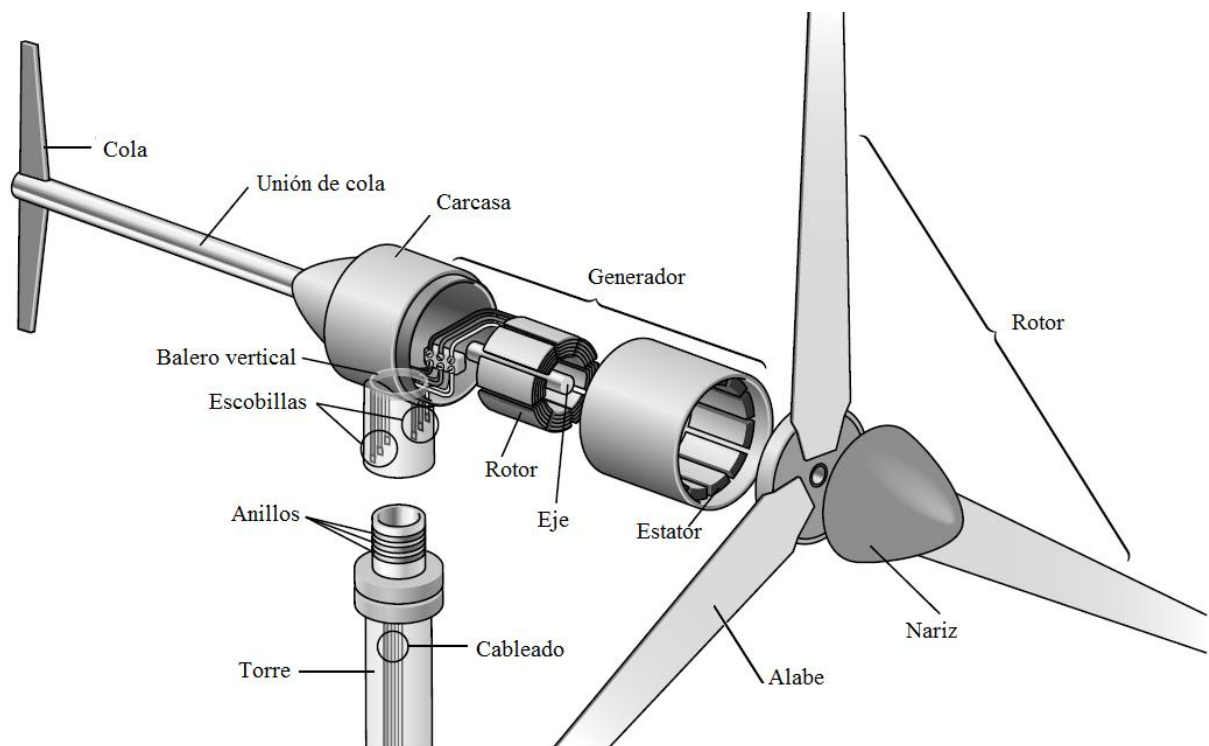


Figura 3.- Diagrama esquemático de un aerogenerador.  
Fuente: (KidWind, 2012).

Funcionamiento de un aerogenerador de baja capacidad

Los componentes principales de un aerogenerador de baja capacidad iniciando de izquierda a derecha son: La veleta o cola son el sistema de orientación más utilizado para los aerogeneradores de eje horizontal; La unión de la cola que se conecta a la carcasa de los componentes del aerogenerador; la cual contiene dentro de la misma, un balero vertical, que permite el giro de direccionamiento frente al viento del aerogenerador; anillos colectores y escobillas, utilizados para evitar nudos de cables eléctricos y transmitir la electricidad; el generador eléctrico, compuesto por un eje, un rotor y un estator; los alabes, encargados de aprovechar la energía cinética del viento; una nariz en forma de cono; y finalmente la torre con su cableado, para posicionarlo a la altura adecuada de captación del viento, (ver figura 4).



**Figura 4.- Componentes de un aerogenerador de baja capacidad.  
Fuente: (Woofenden, 2009).**

### ***2.3.- Medición del viento.***

Para recopilar la información necesaria de las condiciones climatológicas en el emplazamiento, se utilizan distintos instrumentos de medición como el anemómetro y veleta, que registran únicamente la velocidad y la dirección del viento, así como también: sensores de presión, temperatura, humedad, etc. Todos ellos instalados sobre un soporte: la torre de medición o torre meteorológica.

#### *Torre meteorológica.*

La torre meteorológica es la estructura sobre la cual se instalan los sensores necesarios para caracterizar el viento, en el emplazamiento del futuro parque eólico, así como otros parámetros. Dependiendo de la orografía del terreno se determina el punto y el número de torres a instalar.

Para el estudio de un parque eólico, la torre de medición debe instalarse en terreno abierto y en una posición que sea representativa de las condiciones medias del terreno.

Una estación meteorológica se encuentra en un lugar escogido adecuadamente para colocar los diferentes instrumentos que permiten medir las distintas variables que afectan al estado de la atmósfera. Es decir, una estación meteorológica es un lugar que nos permite la observación de los fenómenos atmosféricos y donde hay aparatos que miden las variables atmosféricas. Hay una clase de estaciones que deben estar protegidos de las radiaciones solares y de las inclemencias del tiempo para que no alteren los datos y se encuentran dentro de una garita meteorológica y el aire debe circular por dicho interior.

Una garita meteorológica es una casilla donde se instalan los aparatos del observatorio meteorológico que se deben proteger. Ha de ser una especie de casilla elevada un metro y medio del suelo (como mínimo elevada 120 cm) y con paredes en forma de persiana; éstas han de estar colocadas de manera que priven la entrada de los rayos solares en el interior para que no se altere la temperatura y la humedad. La puerta de la garita ha de estar orientada al norte y la teja debe estar ligeramente inclinada. En su interior están los instrumentos que han de estar protegidos como son los aparatos registradores.

Los instrumentos de medición en una torre meteorológica son los siguientes:

- Termómetro: medidas de temperaturas en horarios determinados del día.
- Termómetro de subsuelo: para medir la temperatura a 5,10, 20 50 y 100cm de profundidad.
- Termómetro de mínima junto al suelo: mide la temperatura mínima a una distancia de 15cm sobre el suelo.
- Barómetro: medida de la presión atmosférica en superficie.
- Pluviómetro: medida de la cantidad de precipitación.
- Psicrómetro: medida de la humedad relativa del aire y la temperatura del punto de rocío.
- Piranómetro: medida de la insolación solar.
- Heliógrafo: medida de las horas del sol.
- Anemómetro: medida de la velocidad del viento.
- Veleta: para registrar la dirección del viento

Nota: Debido a la relevancia de esta tesis solo se definirán los instrumentos de medición del viento.

#### Anemómetro.

Es el instrumento mediante el cual se registra la velocidad del viento. Un pequeño error de calibración arroja un error en la medición de la velocidad. Actualmente existen en el mercado anemómetros de múltiples formas, tamaños y principios de funcionamiento.

#### Anemómetro de cazoletas.

Posee tres cazoletas montadas simétricamente alrededor de un eje vertical. Debido a que la fuerza que ejerce el viento en el lado cóncavo es mayor que en el lado convexo, el bloque gira. El instrumento proporciona una salida analógica (un tren de pulsos) proporcional a la velocidad de viento. La frecuencia de los pulsos indica la velocidad del viento, (ver figura 5).

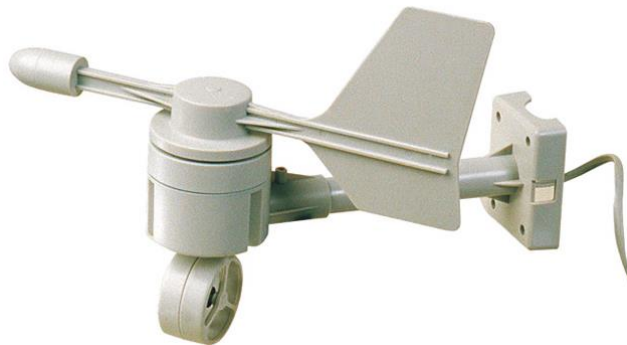


**Figura 5.- Anemómetro de cazoletas**

### Veleta

Permite determinar la dirección del viento y consiste de un dispositivo montado sobre un eje vertical y de giro libre, que puede moverse cuando el viento cambia de dirección (*ver figura 6*). Mediante una señal de pulsos convierte la posición angular en un valor de dirección comprendida entre  $0^\circ$  y  $359^\circ$  (algo menor debido al ángulo muerto).

Estas no presentan una variedad tan amplia como los anemómetros, suelen ser elementos sencillos de carácter mecánico, aunque las puede haber de gran sofisticación tecnológica. Al contrario de los anemómetros, las veletas no suelen calibrarse, puesto que sus requerimientos no son muy elevados, y generalmente es suficiente con que su precisión sea menor que  $5^\circ$ .



**Figura 6.- Veleta desmontada.**

Sin embargo, su montaje si debe tener una serie de consideraciones que permitan establecer la dirección del viento con fiabilidad, ya que una desviación en la medida de la dirección conlleva un mal diseño del parque eólico y por consiguiente unas pérdidas económicas elevadas.

Incluso es importante, en zonas con elevada latitud, medir la inclinación magnética, diferencia en grados entre el norte magnético y el norte geográfico. Este valor puede llegar a alcanzar valores del entorno de los 20°, valor nada despreciable.

#### ***2.4.- Control en diferentes aerogeneradores.***

Existen diferentes tipos de control para aerogeneradores, usualmente para aerogeneradores de alta capacidad se clasifican en: Control del torque del generador, control de frenado, control aerodinámico y control de orientación, a continuación se describe cada uno de ellos:

1. Control del generador de torque (Generator torque control): la fuerza de torque puede ser regulada por las características del diseño del generador eléctrico que tiene conexión a la red o independientemente controlado con el uso de convertidores electrónicos de energía. El convertidor determina la frecuencia, fase y corriente de voltaje seguido del generador, de esta manera se puede controlar el generador de torque.
2. Control de frenado (brake torque control): Es el estado de paro regulado o paro total del aerogenerador y es logrado en su gran mayoría por un sistema de frenado tanto en alta y baja velocidad del eje del aerogenerador. Los frenos típicamente son neumáticos, hidráulicos o de resorte aplicado.
3. Control Aerodinámico (Aerodynamic torque control or pitch control): es el tipo de proceso de control más común para la generación de energía. Por debajo de una velocidad de viento en donde la turbina simplemente busca la máxima producción de energía posible, esto es cuando se presenta una velocidad de viento dada, el ángulo de las palas se modificará unos cuantos grados, por medio de unos engranes

acoplados a los alabes para aprovechar la energía disponible en el viento y cambiar rápidamente el ángulo de ataque como le sea requerido.

4. Control de Orientación (yaw orientation control): Este control se refiere a la redirección de la punta del aerogenerador a la dirección del viento, en forma de giroscopio, pero el acto del movimiento de orientación debe ser con lentitud. Existen en la actualidad algoritmos de control complejos que se usan para este tipo de control.

### **Operación típica de aerogeneradores conectados a la red.**

Los procesos de control mencionados anteriormente (control del generador de torque, frenado, aerodinámico y orientación), así como otros procesos, pueden ser usados en una variedad de combinaciones para conectar a un aerogenerador que satisfactoriamente pueda convertir la energía cinética del viento a energía eléctrica. La estrategia operacional determinará los diversos componentes a controlar. El proceso de conexión de un aerogenerador a la red eléctrica difiere según sea el tipo de maquina; así, máquinas de paso fijo y velocidad fija o maquinas con cambio de paso y velocidad variable.

### **Aerogeneradores de paso fijo con velocidad.**

Una vez que el control ha verificado todas las variables necesarias y no ha detectado ninguna anomalía, esperará a que se supere el límite mínimo de velocidad del viento para comenzar a generar electricidad. Si se cumple esta condición, activa el sistema de orientación y una vez orientado, libera el freno eléctrico, a la vez que coloca las palas en posición de operación (mínimo ángulo). El aerogenerador de esta manera está ya preparado para efectuar la conexión a red.

El aerogenerador comenzará a girar hasta alcanzar una velocidad mínima de rotación del eje de alta velocidad, momento en el cual, activa el sistema de arranque para que la conexión se produzca sin esfuerzos mecánicos ni corrientes elevadas de conexión. Una vez conectada, el sistema de control puentea el sistema de arranque y conecta las etapas de compensación de reactiva.

### Sistemas de paso variable y velocidad variable

El sistema mide la velocidad de viento continuamente. Si durante pocos minutos se detecta una velocidad de viento suficiente para el funcionamiento del aerogenerador, se inicia el proceso de arranque automático. A continuación, se alinea la góndola en la dirección del viento y las palas del rotor se ponen en posición de funcionamiento. Al alcanzar el límite inferior de revoluciones, el aerogenerador comienza a suministrar potencia a la red.

### Desconexión de red

El sistema de control está continuamente supervisando las revoluciones del rotor de alta; si las revoluciones disminuyen por debajo de un valor mínimo, se desconecta la compensación de reactiva y luego se desconecta el aerogenerador de la red.

## **2.5.- Sistemas de control en aerogeneradores de baja capacidad.**

La selección de los componentes del sistema de control y su propia configuración dependen significativamente en específico con el diseño del aerogenerador. El sistema de control deberá ser diferente en función del tamaño del aerogenerador. Para pequeñas máquinas o baja capacidad, el control será simple y normalmente pasivo, por el contrario, para grandes máquinas (media y alta capacidad), el sistema de control será más complicado debido a los múltiples parámetros a medir y el aumento de precisión requerido, pero representará un costo, que aunque alto, es pequeño comparado con el costo total.

### Sistema de control activo.

Los sistemas de control activos son los que utilizan sistemas eléctricos, mecánicos, hidráulicos y neumáticos o combinaciones de los anteriores para alcanzar su propósito. Existen 2 clases de sistemas de control en el aerogenerador, el sistema de control de supervisión (*supervisory control*) es el que maneja y monitorea la operación del aerogenerador y las acciones de secuencias de control (ejemplo: la liberación del freno). La otra clase de control es el sistema de control dinámico (*dynamic control*), es el que maneja

los aspectos de la operación de la maquinaria en donde la dinámica de la maquinaria afecta la salida de las acciones de control (ejemplo: rotación de los alabes en posición bandera por tener aire turbulento).

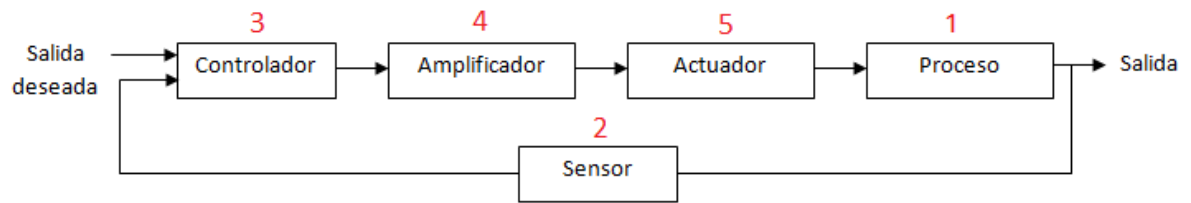
Los objetivos principales de un sistema de control son:

- Automatización del aerogenerador.
- Funcionamiento de la turbina en relación con el viento (orientación, regulación de velocidad, etc.).
- Toma de decisión automática de conexión / desconexión del generador.
- Protección al sistema (sobre-velocidades, vibraciones, sobre-calentamientos).
- Maximización del rendimiento del sistema.
- Señalización automática de posibles averías o funcionamientos incorrectos disminuyendo los costos de mantenimiento.
- Incremento de la vida útil del aerogenerador (minimizando y maximizando las cargas imprevistas que se pueden presentar).

#### Componentes de un sistema de control

El proceso de un control mecánico y eléctrico requiere de 5 principales componentes funcionales:

1. Un proceso que tiene un punto o puntos que permitan al proceso que pueda cambiarse, (*ver figura 7*).
2. Sensores o indicadores para comunicar el estado del proceso al sistema de control.
3. Un controlador, que consiste en un hardware o un software lógico, para determinar la acción de control que se debe de tomar.
4. Amplificadores que suministren la energía suficiente para tomar la acción de control.
5. Actuadores o componentes para la intervención del proceso para cambiar la operación del sistema.



**Figura 7.- Diagrama de flujo de componentes para un sistema de control.**

### ***CAPÍTULO 3.- Estudio teórico por medio de la simulación del sistema de control.***

Control es un concepto muy común y es ampliamente usado por muchas personas en la vida cotidiana. El término es usado habitualmente para hacer referencia a la interacción entre el hombre y lo que lo rodea, más específicamente a la interacción hombre/máquina, un ejemplo sencillo es el de conducir un automóvil donde es necesario controlar el vehículo para lograr llegar al destino deseado, sistemas como este son llamados de control manual.

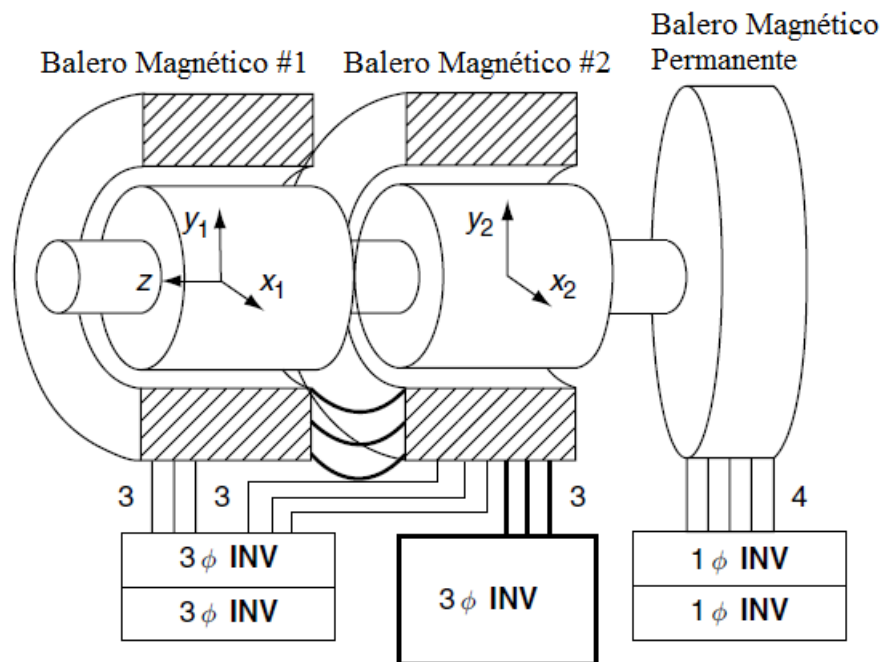
El control automático involucra solamente a maquinas, por ejemplo el control del nivel de agua de un tanque, donde dependiendo del nivel del líquido se abrirá o cerrara la válvula correspondiente a su llenado. El control automático surge para liberar al hombre de tareas repetitivas, donde la complejidad del sistema a controlar es elevada o la operación es riesgosa, puede haber gran cantidad de motivos por la cual se opta por el control automático. El control manual es llevado a cabo por personas que conoce (aunque sea de manera aproximada) el proceso a controlar y saben cómo debe ser el resultado de su control y como lograrlo, en la industria, estas personas (operarios) cuentan con experiencia y conocimiento suficiente para cumplir con los objetivos de control.

En la primera parte de este capítulo, se describirá el sistema convencional de levitación magnética por medio de baleros magnéticos, lo cual no ayudará a realizar nuestras pruebas con el modelo prototipo (Proyecto prototipo versión 1.0 y 2.0 con electroimanes) para determinar el mejor sistema de control. En la segunda parte, se explicará de manera básica los sistemas de control que existen que son de gran relevancia para nuestros sistemas: lazo cerrado, lazo abierto, control PID y lógica difusa.

Para terminar, se describe brevemente la comparación entre dichos sistemas de control y esto poder determinar la opción óptima para nuestro proyecto.

### 3.1.- Descripción del sistema convencional.

La estructura de un sistema convencional de baleros magnéticos activos (BMA) consiste en 2 baleros magnéticos activos que tienen un rotor simple y un balero magnético permanente (BMP). Cada balero magnético genera fuerzas radiales, así como un torque rotacional (ver figura 8). El balero magnético #1 es responsable por la posición radial de  $x_1$  y  $y_1$ , mientras que el balero magnético #2 es responsable de la posición radial de  $x_2$  y  $y_2$  y el balero magnético permanente funciona para la estabilidad en  $z$ .



**Figura 8.- Estructura de un sistema de baleros magnéticos activos.**  
(Fuente: (Chiba, 2005))

El torque total del rotor es el doble de torque nominal de cada uno de los dos baleros magnéticos activos y esto es debido a que los baleros magnéticos comparten la producción de torque. Cada balero magnético tiene tres terminales para la suspensión de embobinados, así como también, tres terminales para el embobinado del motor. El motor respectivo de fase de embobinado de cada unidad está conectado en serie como se muestra en la figura 8. Un inversor trifásico es conectado a la conexión en serie del embobinado del motor para suministrar el voltaje variable y la frecuencia del motor.

Ventajas de utilizar los baleros magnéticos:

- Compacto: La longitud del rotor es más corta cuando se utilizan baleros magnéticos, resultando una operación más estable y de velocidades más altas.
- Bajo costo: El número de cables e inversores es menor, y de la misma manera los inversores trifásicos estándares también son utilizados debido a su bajo costo.
- Alta potencia: Los baleros magnéticos pueden generar un aumento de potencia si la longitud del rotor es la misma.

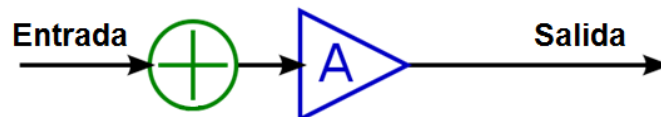
Las ventajas antes mencionadas son el resultado de la interacción de los baleros magnéticos activos radiales y el motor.

### 3.2.- Estudio de diferentes estrategias de control.

La selección de una sola estrategia de control o de un sistema de control conlleva a la siguiente pregunta: ¿Cuál es el sistema más óptimo para mi planta?, por ende, se necesita dar una revisión a los diferentes tipos de control que nos rodean. Realizar una comparativa entre dichas estrategias siendo el caso del sistema de control realimentado, sistema de control en lazo abierto, control PID y por ultimo pero no menos importante: sistema de control por lógica difusa. (Ogata, 1998).

#### Sistemas de control en lazo abierto

Un sistema en el cual la salida no tiene efecto sobre la acción de control se denomina sistema de control en lazo abierto. Es decir, en un sistema de control en lazo abierto no se mide la señal de salida “A” ni se realimenta para compararla con la entrada. Así, a cada entrada de referencia le corresponde una condición de operación fija; como resultado de ello, la precisión del sistema depende de la calibración, cuando existe perturbaciones en un sistema de lazo abierto este mismo sistema de control no realiza la tarea deseada. (ver figura 9).



**Figura 9.- Esquema de sistema de control en lazo abierto.**

Ventajas fundamentales de un sistema de control en lazo abierto:

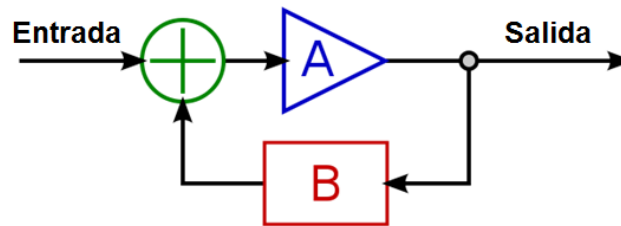
- Construcción simple y facilidad de mantenimiento.
- Menos costosos que el correspondiente sistema en lazo cerrado.
- No existe problemas de estabilidad.
- Convenientes cuando la salida es difícil de medir o cuando medir la salida de manera precisa no es económicamente viable.

Desventajas fundamentales de los sistemas de control en lazo abierto son:

- Al existir perturbaciones en el sistema, la salida puede sufrir cambios.
- Al realizar un cambio en la calibración tienden a originar errores, por lo tanto, la salida puede ser diferente de lo que se desea.
- Para mantener la calidad requerida en la salida, es necesaria la recalibración de vez en cuando.

Sistemas de control realimentados o en lazo cerrado

El sistema de control realimentado en donde “A” es la señal de salida y “B” es la señal de salida que se redirige a la entrada para regular su comportamiento, esto es con la finalidad de comparar ambas señales y utilizar la diferencia como modo de control, se denomina también como lazo cerrado, (ver figura 10).



**Figura 10.- Esquema de sistema de control realimentado.**

Algunos de los efectos de la realimentación son:

- Reduce el efecto de las variaciones de los parámetros.
- Reduce los efectos de las entradas de perturbación.
- Mejora la respuesta transitoria.
- Reduce los errores en el estacionario.

### 3.2.1.- Control PID.

Es común referirse a un PID como un controlador ubicuo, debido a su tremenda penetración en la industria de procesos. Las acciones que conforman al controlador PID son: proporcional (P), integral (I) y derivativa (D). (Fernández, 2013).

#### Acción proporcional (P).

La salida de un controlador proporcional es el producto de la multiplicación de la señal de error y la ganancia proporcional, de manera que la relación entre la señal de error  $e(t)$  y la señal de control  $u(t)$  esta dada por:

$$u(t) = K_c e(t) + u_0 \text{-----} [\text{Ec. 03}]$$

Al parámetro  $K_c$  se le conoce como ganancia proporcional.

El término  $u_0$  representa el valor en estado estacionario de la señal de control cuando el error es cero, llamado offset; por lo tanto, si tomamos la transformada de Laplace de esta expresión, debemos contemplar la variable de desviación  $u(t) - u_0$ , de manera que la función de transferencia para este controlador es:

$$U(s) = K_c E(s) \text{-----} [\text{Ec. 04}]$$

Un controlador proporcional puede controlar cualquier planta estable, pero posee desempeño limitado y la variable proceso a menudo se desvía del punto de asignación.

#### Acción integral (I).

El modo de control integral tiene como propósito disminuir y eliminar el error en estado estacionario, la acción de control integral da una salida del controlador que es proporcional al error acumulado, lo que implica que es un modo de controlar lento.

$$u(t) = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \text{-----} [\text{Ec. 05}]$$

Donde  $K_i$  es la ganancia integral y  $\tau$  es una constante de tiempo. La señal de control  $u(t)$  tiene un valor diferente de cero cuando la señal de error  $e(t)$  es cero. Por lo que se

concluye que dada una referencia constante, o perturbaciones, el error en régimen permanente es cero.

#### Acción derivativa (D).

La acción derivativa se muestra cuando hay un cambio en el valor absoluto del error. El error es la desviación existente entre el punto de medida y el punto asignado. La función de la acción derivativa es mantener el error al mínimo corrigiéndolo proporcionalmente con la misma velocidad que se produce.

Se deriva con respecto al tiempo y se multiplica por una constante  $d$  para luego sumarse a las acciones proporcional y derivativa.

$$u(t) = K_d \frac{de}{dt} \text{-----} \text{ [Ec. 06]}$$

El control derivativo se caracteriza por el tiempo de acción derivada en minutos de anticipo.

#### Acción proporcional, integral y derivativa (PID).

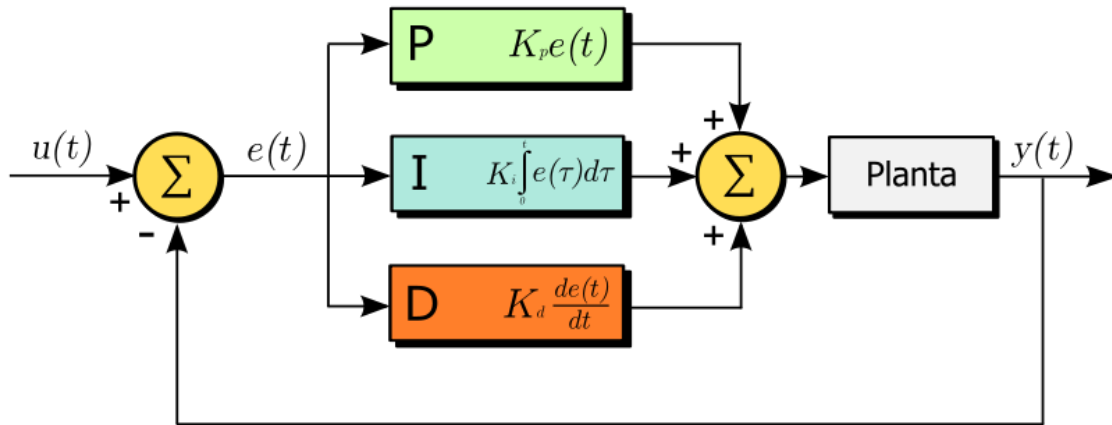
La estructura de un controlador PID es simple, aunque su simpleza es también su debilidad, dado que limita el rango de plantas donde pueden controlar en forma satisfactoria. Al combinar las tres acciones de control sus efectos se suman y reúne las ventajas de cada una de las tres acciones de control individuales, (*ver figura 11*). La ecuación de un controlador con esta acción combinada se obtiene mediante:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \text{-----} \text{ [Ec. 07]}$$

Por lo tanto:

$$u(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \text{-----} \text{ [Ec. 08]}$$

El término  $e + T_d \frac{de}{dt}$  es una predicción lineal del error  $T_d$  unidades de tiempo en el futuro. Los parámetros del controlador se llaman: ganancia proporcional  $K$ , tiempo integral  $T_i$ , tiempo derivativo  $T_d$ .



**Figura 11.- Esquema del sistema de control proporcional, integral y derivativo (control PID).**

Técnicas de sintonización de compensadores (PID).

Básicamente existen 3 formas para sintonizar manualmente los compensadores PID industriales

1. Método de tanteo.

Requiere la experiencia del técnico en control.

2. Método basado en la utilización Función de Transferencia de la planta.

Se requiere un acercamiento analítico bastante riguroso que consta de un modelo matemático de la dinámica del proceso.

3. Método de Ziegler-Nichols y/o Método de Cohen Coon.

Ofrecen una solución intermedia entre los dos anteriores. Se aplican a la mayoría de los sistemas de control, pero se aprecia más su utilidad cuando el modelo de la planta a controlar no se conoce y los métodos analíticos no pueden ser empleados.

### ***3.2.2.-Control por Lógica Difusa.***

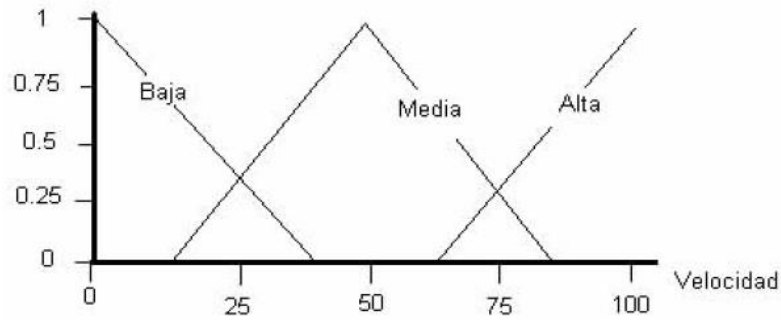
El concepto de lógica difusa es muy común, y está asociado con la manera en que las personas perciben el medio, por ejemplo ideas relacionadas con la altura de una persona, velocidad con la que se mueve un objeto, la temperatura dominante en una habitación, cotidianamente se formulan de manera ambigua y depende de quién percibe el efecto físico o químico, será su enunciado acerca de tal fenómeno.

La incorporación de lógica difusa a los sistemas de control da lugar a lo que llamaremos sistemas de control difuso. Dentro de los sistemas de control se encuentran dos grandes áreas, el modelado o identificación y el control propiamente dicho o control directo. Nos enfocaremos en el control de procesos suponiendo conocido el modelo de este.

La idea es muy simple, se trata de determinar de manera lógica que se debe hacer para lograr los objetivos de control de mejor manera posible a partir de una base de conocimiento proporcionada por un operador humano, sin esta base no es posible desarrollar una aplicación y que esta funcione de manera correcta. (Ross, 2010).

#### *Conjuntos borrosos*

Los conjuntos clásicos, tienen limitaciones, se define un universo de discurso que contiene a conjuntos cuyos bordes están bien definidos, un elemento puede o no pertenecer a cierto conjunto, algo es verdadero o falso, no se definen situaciones intermedias. Los conjuntos borrosos son una extensión de los clásicos, donde se añade una función de pertenencia, definida esta como un número real entre 0 y 1. Así se introduce el concepto de conjunto o subconjunto borroso y se lo asocia a un determinado valor lingüístico, definido por una palabra o etiqueta lingüística, donde esta ese el nombre del conjunto o subconjunto. Por cada conjunto se define una función de pertenencia o membresía denominada  $\mu_{A(x)}$ , indica el grado en que la variable  $x$  esta incluida en el concepto representado por la etiqueta  $A$  ( $0 \leq \mu_{A(x)} \leq 1$ ), si esta función toma el valor 0 significa que tal valor de  $x$  no esta incluido en  $A$  y si toma el valor 1 el correspondiente valor de  $x$  está absolutamente incluido en  $A$ .



**Figura 12.- Ejemplo de subconjuntos borrosos para el conjunto velocidad.**

En la figura 12, se puede apreciar un ejemplo donde el conjunto velocidad (variable  $x$ ) está subdividido en 3 subconjuntos {Baja, Media, Alta}, con sus respectivas funciones de membresía  $\{\mu_{Baja(x)}, \mu_{Media(x)}, \mu_{Alta(x)}\}$ .

Definición. Sea  $X$  una colección de objetos, expresados en forma genérica por  $x$ . Entonces, un conjunto difuso  $A$  en  $X$ , define como un conjunto de pares ordenados.

$$A = \{(x, \mu_{A(x)}) / x \in X\}$$

Donde  $\mu_{A(x)}$  es una función de pertenencia cuya etiqueta es  $A$  y su dominio es  $x$ .

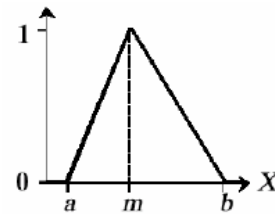
### Funciones de membresía

Las funciones de membresía representan el grado de pertenencia de un elemento a un subconjunto definido por una etiqueta.

Existe una gran variedad de formas para las funciones de membresía, las más comunes son del tipo triangular, forma "S", trapezoidal, singleton. (ver figura 13).

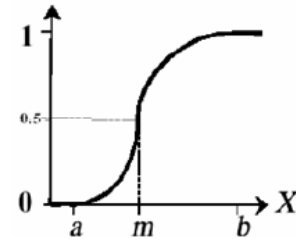
Forma Triangular

$$A(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq a \\ (x-a)/(m-a) & \text{si } x \in (a, m] \\ (b-x)/(b-m) & \text{si } x \in (m, b) \\ 1 & \text{si } x \geq b \end{cases}$$



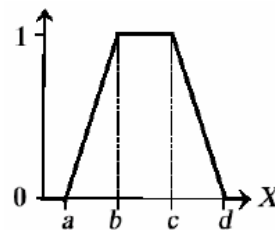
Forma S

$$A(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq a \\ 2\{(x-a)/(b-a)\}^2 & \text{si } x \in (a, m] \\ 1-2\{(x-a)/(b-a)\}^2 & \text{si } x \in (m, b) \\ 1 & \text{si } x \geq b \end{cases}$$



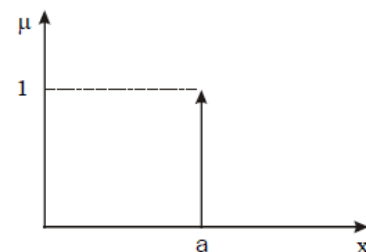
Forma Trapezoidal

$$A(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } (x \leq a) \vee (x \geq d) \\ (x-a)/(b-a) & \text{si } x \in (a, b] \\ 1 & \text{si } x \in (b, c) \\ (d-x)/(d-c) & \text{si } x \in (c, d) \end{cases}$$



Forma singleton

$$A(x) = \begin{cases} 1 & x = a \\ 0 & x \neq a \end{cases}$$



**Figura 13.- Funciones de membresía más comunes para los sistemas de control difuso, Forma triangular. Forma "S", trapezoidal y singleton.**

### Operaciones borrosas

A los subconjuntos se les puede aplicar determinados operadores o bien se puede realizar operaciones entre ellos. Al aplicar un operador sobre un solo conjunto se obtendrá otro conjunto, lo mismo sucede cuando se realiza una operación entre conjuntos.

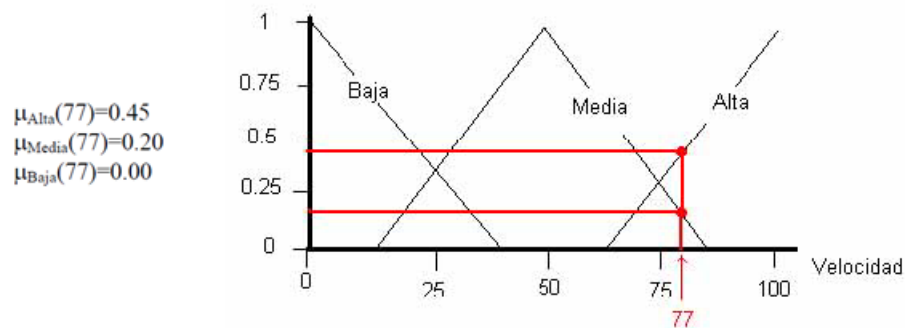
Las operaciones lógicas se utilizan en controladores y modelos difusos, son necesarias en la evaluación del antecedente de reglas (y otras etapas) que más adelante veremos.

Hay muchas definiciones para las operaciones lógicas, algunas otras definiciones que normalmente también se utilizan son: Operador lógico AND y operador lógico OR.

### Fuzzificación

El control difuso siempre involucra este proceso de Fuzzificación, esta operación se realiza en todo instante de tiempo, es la puerta de entrada al sistema de inferencia difusa. Es un procedimiento matemático en el que se convierte un elemento del universo de discurso (variable medida del proceso) en un valor en cada función de membresía a las cuales pertenece.

En la figura 14, el valor de velocidad es igual a 77 pertenece a dos conjuntos con distintos grados en cada uno.



**Figura 14.- Ejemplo de Fuzzificación de una variable.**

A partir de ahora y durante el resto de las operaciones en el interior del corazón fuzzy estos datos (0.45, 0.20 y 0.00, son valores de las funciones de membresía)

representaran a las variables que sensadas del proceso. A tales datos les llamaremos  $\mu$  en sentido genérico para diferenciarlos de otras funciones de membresía.  $\mu_{A(x)} = \mu$

### Reglas borrosas

Los controladores difusos usan reglas, estas combinan uno o más conjuntos borrosos de entrada llamados antecedentes o premisas y le asocian un conjunto borroso de salida llamado consecuente o consecuencia. Involucran a conjuntos difusos, lógica difusa e inferencia difusa. A estas reglas se les llama reglas borrosas o difusas o fuzzy rules. Son afirmaciones del tipo SI-ENTONCES. Los conjuntos borrosos del antecedente se asocian mediante operaciones lógicas borrosas AND, OR, etc. Las reglas borrosas son proposiciones que permiten expresar el conocimiento que se dispone sobre la relación entre antecedentes y consecuentes. Para expresar este conocimiento de manera completa normalmente se precisan varias reglas, que se agrupan formando lo que se conoce como base de reglas, es decir, la edición de esta base determina cual será el comportamiento del controlador difuso y es aquí donde se emula el conocimiento o experiencia del operario y la correspondiente estrategia de control.

Existe una gran variedad de tipos de reglas, dos grandes grupos son los que en general se emplean, las reglas difusas de Mamdani y las reglas difusas de Takgi-Sugeno (TS, para abreviar). La estructura de las reglas es la misma tanto para controladores como para modelos, simplemente cambiaran las variables implementadas. El sistema de control difuso utilizado para este proyecto son las reglas difusas de Mamdani, por lo tanto, nos enfocaremos solo en ellas.

### Reglas difusas de Mamdani

La regla difusa de Mamdani trata de un sistema en cuyo interior la información se representa y procesa empleando la lógica difusa. Cada variable de entrada y salida se representa al interior del sistema por medio de una variable lingüística. Un ejemplo de la estructura es la siguiente:

***IF x1 is A AND x2 is B AND x3 is C THEN u1 is D, u2 is E***

Donde  $x_1$ ,  $x_2$  y  $x_3$  son las variables de entrada (error, derivada del error y derivada segunda del error) A, B y C son funciones de membresía de entrada (por ejemplo, alto, medio, bajo),  $u_1$  y  $u_2$  son las acciones de control (apretura de válvulas) en sentido genérico son todavía variables lingüística (todavía no toman valores numéricos), D y E son las funciones de membresía de la salida, en general se emplean singleton por su facilidad computacional, y AND es un operador lógico difuso, podría ser otro. La primera parte de la sentencia “ *IF  $x_1$  is A AND  $x_2$  is B AND  $x_3$  is C* ” es el antecedente y la restante “ *C THEN  $u_1$  is D,  $u_2$  is E* ” es el consecuente.

Un ejemplo es

**IF error IS Positivo Grande AND derivada del error IS Positiva Baja THEN u IS Positiva Chica.**

Ventaja:

- Es intuitivo.
- Tiene una amplia aceptación.
- Está bien adaptado a la incorporación de conocimiento y experiencia.

#### Inferencia borrosa

Las reglas difusas representan el conocimiento y la estrategia de control, pero cuando se asigna información específica a las variables de entrada en el antecedente, la inferencia difusa es necesaria para calcular el resultado de las variables de salida del consecuente, este resultado es en términos difusos, es decir que se obtiene un conjunto difuso de salida de cada regla, que posteriormente junto con las demás salidas de reglas se obtendrá la salida del sistema.

#### Agregado

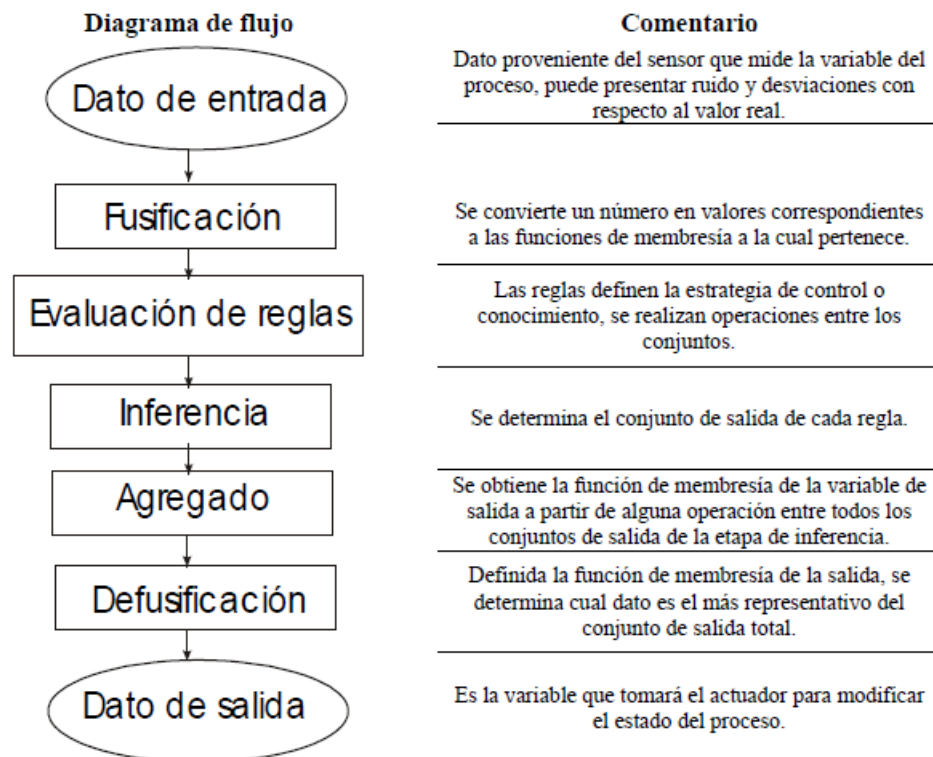
Cuando se evalúan las reglas se obtienen tantos conjuntos difusos como reglas existan, para defusificar es necesario agrupar estos conjuntos, a esta etapa se le llama agregado y existen varios criterio para realizar este paso. Un criterio muy empleado es el de agrupar los conjuntos inferidos mediante la operación max.

### Defusificación

La defusificación (*defuzzyfication*) es un proceso matemático usado para convertir un conjunto difuso en un número real. El sistema de inferencia difusa obtiene una conclusión a partir de la información de la entrada, pero es en términos difusos. Esta conclusión o salida difusa es obtenida por la etapa de inferencia borrosa, esta genera un conjunto borroso pero el dato de salida del sistema debe ser un número real y debe ser representativo de todo el conjunto obtenido en la etapa de agregado, es por eso que existen diferentes métodos de defusificación y arrojan resultados distintos, el “más común y ampliamente usado” es el centroide. Con el método de defusificación del centroide se transforma la salida difusa en un número real, el cual es la coordenada equis ( $x$ ) del centro de gravedad de tal conjunto difuso de salida.

### Resumen del proceso de inferencia difusa

En la figura 15, se muestra una manera esquemática del control por lógica difusa en forma de diagrama de flujo, a su vez en cada etapa es agregado un comentario.



**Figura 15.- Etapas para la toma de decisión.**

### ***3.3.- Comparación de las diferentes estrategias de control.***

Se estuvo analizando diferentes tipos de estrategias y/o sistemas de control, como, los sistemas de control realimentado, lazo abierto, y de igual modo los sistemas proporcional, integral y derivativo (PID) y la lógica difusa, en esta sección podremos ver un comparativo entre dichas estrategias y sistemas de control.

#### *Sistemas de control retroalimentado vs sistemas de control en lazo abierto.*

Una ventaja del sistema de control en lazo cerrado es que el uso de la realimentación vuelve la respuesta del sistema relativamente insensible a las perturbaciones externas y a las variaciones internas en los parámetros del sistema. Es así posible usar componentes relativamente poco precisos y baratos para obtener el control adecuado de una planta determinada, mientras que hacer eso es imposible en el caso de un sistema en lazo abierto.

El número de componentes utilizado en un sistema de control retroalimentado es mayor que el sistema de control equivalente en lazo abierto. Por lo tanto, el sistema de control en lazo cerrado suele tener costos y potencias más grandes. Para disminuir la potencia requerida de un sistema, se emplea un control en lazo abierto siempre que pueda aplicarse. Por lo general, una combinación adecuada de controles en lazo abierto y en lazo cerrado es menos costosa y ofrecerá un comportamiento satisfactorio del sistema global.

#### *Sistemas de control PID vs sistemas de control difuso (Lógica difusa).*

Las ventajas de utilizar los sistemas de control difuso es que provee una eficiente y efectiva metodología para desarrollar en forma experimental un controlador no lineal sin usar matemática avanzada. Hacer un controlador difuso requiere de una descripción lingüística de la ley de control, tal descripción es capturada por los conjuntos y operadores difusos y reglas difusas. El controlador no necesita explícitamente del modelo del proceso a controlar. En muchas situaciones no lineales, el problema de control puede usualmente ser solucionado de manera más efectiva y eficiente que el control clásico (PID). Se puede trabajar tanto con sistemas SISO (single input/single output) como MIMO (Múltiple input/múltiple output) sin usar matemática sofisticada, desde el punto de vista de los

sistemas no lineales, esta es una gran ventaja. Se cuenta con la manipulación de varias variables del controlador, como, conjuntos difusos, factores de escalamiento, etc., junto con simulaciones y el método de prueba y error, se puede desarrollar un controlador no lineal con buenas prestaciones. Esta es una ventaja importante desde el punto de vista industrial.

Ningún software matemático genera la estructura del controlador, de ahí que el análisis de estabilidad (o de cualquier otra propiedad) es muy complejo y solo está basado en que la implementación del conocimiento genere un sistema estable. La estabilidad no es garantizada desde el punto de vista matemático, si puede serlo desde el punto de vista experimental.

El ajuste de los parámetros del controlador (factores de escalamiento) no cuenta con técnicas tan difundidas como es el caso de los controladores PID. La construcción de un controlador difuso es más parecida a un arte que a una ciencia. La cantidad de parámetros en un controlador difuso es mucho mayor que en un PID, hay una gran variedad de definición de operadores, formas de conjuntos, etc., lo que es una desventaja por lo que, no hay una clara relación entre ellos.

El procedimiento de diseño y ajuste del controlador difuso puede requerir de mucho trabajo, la herramienta de simulación de prueba y error es frecuentemente utilizada. La tecnología en lógica difusa es efectiva en la mayoría de las aplicaciones cotidianas, pero en áreas como la ingeniería nuclear, aeroespacial, biomédica, entre otras, sigue en investigaciones y pruebas continuas.

## ***CAPÍTULO 4.- Construcción del sistema experimental de control en un eje vertical.***

Esencialmente un aerogenerador es un dispositivo que captura parte de la energía del viento (energía cinética) y la transforma en energía eléctrica. De cierto modo, la estrategia de control describe como un aerogenerador o en nuestro caso “Un sistema de control para la levitación de un rotor con electroimanes” es programado para mantenerse en un estado de equilibrio. Por consiguiente, la estrategia de control afecta en el mismo controlador utilizado. De hecho los esquemas de control pueden diferir de una región de operación a otra.

### ***4.1.- Descripción del sistema propuesto.***

El sistema propuesto consiste en el sistema de control para la levitación de un rotor (cuerpo ferromagnético) por medio de magnetos solenoides eléctricos el cual mantendrá en equilibrio dicha pieza ferromagnética en un solo eje (para este caso será el eje vertical o eje “y” siendo de vista frontal), las perturbaciones que reciba por parte de cualquier otro eje no serán considerados debido a la protección mecánica que tiene, esto es, está diseñado para solo estudiar y responder para un solo eje. Se colocaron a prueba para su comparación 2 sistemas de control (control PID y Lógica difusa), esto es, para su propia autoevaluación. El sistema de adquisición de datos o interfaz de control es una tarjeta de marca Arduino, modelo MEGA 2560 (*ver anexo B para ficha técnica*). El lenguaje de programación es enteramente de manera visual y gráfica por medio de la plataforma de National Instruments (NI). Dentro de la misma plataforma ofrecida por NI, existe el módulo de control PID y Lógica difusa el cual fue utilizado para la programación de dicho sistema.

En esta primera instancia, se analizará el comportamiento del cuerpo ferromagnético con electroimanes como propósito inicial, el estudio de este proyecto será la base para la utilización de baleros magnéticos activos (BMA) en un futuro, y esto solo con el propósito de cumplir la expectativa de poder controlar y mantener en equilibrio de manera radial el rotor y así poder realizar una operación de un rotor sin fricción, una baja vibración en el mecanismo y tener una alta velocidad rotacional.

A continuación se describirán los prototipos en los que se trabajaron, de los cuales se construyeron dos versiones: La versión 1.0 consistió en colocar dos electroimanes en la parte superior de la estructura para así poder manipular las fuerzas magnéticas ascendentes (ver figura 16). La versión 2.0 consistió en agregar dos electroimanes en la parte inferior adicionales a los electroimanes en la parte superior para poder controlar en su totalidad el rotor (cuerpo ferromagnético).

#### 4.1.1.- Prototipo Versión 1.0.

El prototipo inicial consta de dos magnetos solenoides eléctricos (electroimanes), una barra de aluminio (rotor) con diámetro de 1" x 12" de longitud con dos rodamientos de diámetro de 2" x 2" de longitud de acero 4140 cada uno como cuerpo ferromagnético y una estructura fabricada enteramente de acrílico, (ver figura 16).

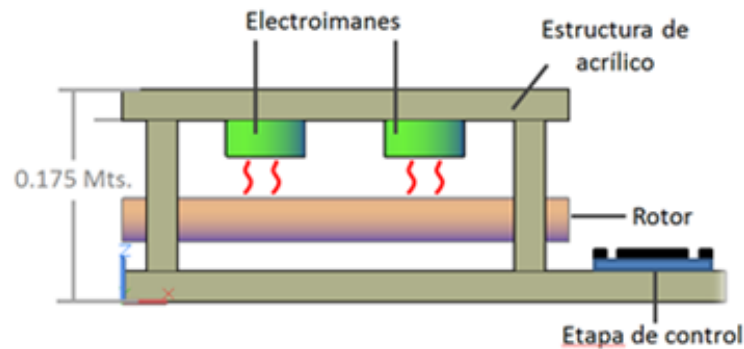


Figura 16.- Vista frontal del prototipo versión 1.0.

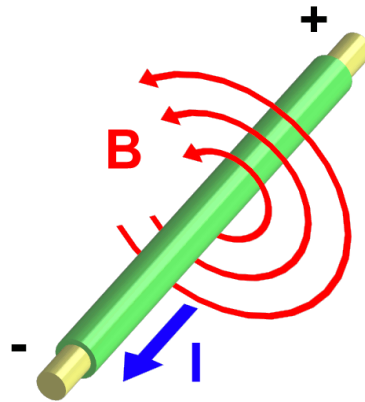
#### Magneto solenoide eléctrico (Electroimán).

El electroimán es un tipo de imán en particular, el cual el campo magnético se produce mediante el flujo de una corriente eléctrica a través de su bobina, desapareciendo en cuanto finaliza dicha corriente eléctrica, (ver figura 17, ver anexo B).

Figura 17.- Magneto solenoide eléctrico (Electroimán).



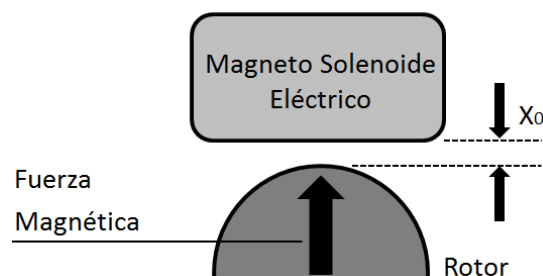
Un magneto solenoide eléctrico está compuesto en su interior, por un núcleo de hierro. Dicho núcleo, se le ha incorporado un hilo conductor, recubierto de material aislante, tal como la seda o el barniz. El hilo se tiene alrededor del núcleo para que dicho electroimán funcione, (ver figura 18).



**Figura 18.- La corriente (I) a través de un núcleo con un hilo como bobina creando un campo magnético (B).**

El campo magnético  $B$  es un punto en el espacio en términos de la fuerza magnética  $F_B$  que el campo ejerce sobre un objeto de prueba, que en este caso es una partícula cargada que se mueve a una velocidad  $v$ . La magnitud  $F_B$  de la fuerza magnética ejercida sobre la partícula es proporcional a la carga  $q$  y a la rapidez  $v$  de la partícula.

La principal ventaja de un electroimán sobre un imán permanente es que el campo magnético puede ser rápidamente manipulado en un amplio rango controlando la cantidad de corriente eléctrica. Sin embargo, se necesita una fuente continua de energía eléctrica para mantener el campo. En la figura 19, se puede apreciar la vista de corte transversal del sistema del rotor con el electroimán funcionando, el espacio  $x_0$  es la distancia que deberá permanecer constante.



**Figura 19.- Vista de corte transversal del sistema del rotor con el electroimán.**

Rotor (pieza ferromagnética)

El rotor es una pieza ferromagnética en la cual se estarán ejerciendo las fuerzas magnéticas en la parte de los magnetos solenoides eléctricos y será la pieza que estará en equilibrio. La pieza ferromagnética está compuesto de Acero 4140 de 2'' de longitud x 2'' de diámetro con una barra de aluminio de 12'' de longitud x 1'' de diámetro con un peso de 1.80 kg. (Ver figura 20).



**Figura 20.- Mangas de acero 4140 como pieza ferro magnética, junto con una barra de aluminio.**

El acero 4140 es un acero medio carbono aleado con cromo y molibdeno de alta templabilidad y buena resistencia a la fatiga, abrasión e impacto. Este acero puede ser nitrurado para darle mayor resistencia a la abrasión. Es susceptible al endurecimiento por tratamiento térmico. El contenido en porcentaje de elementos en el Acero 4140 son: Carbono 0.42%, Manganeso 1%, Cromo 1%, Fierro 97.03%, entre otros, (ver tabla 3, ver anexo B).

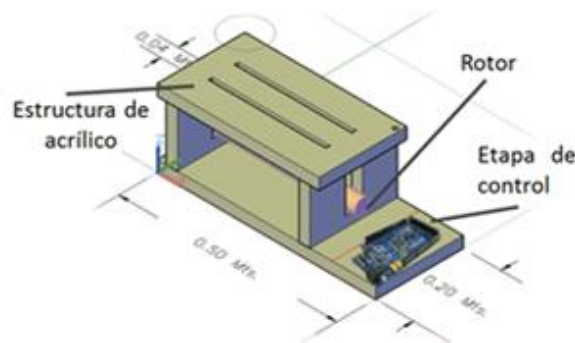
**Tabla 3.- Contenido en porcentaje de cada elemento que conforman al Acero 4140.**

Contenido en %	Elemento
0.420	Carbono
0.300	Silicio
0.200	Molibdeno
1.000	Manganeso
1.000	Cromo
0.025	Azufre
0.025	Fosforo
97.030	Fierro
100.000	Total

El prototipo versión 1.0 tiene como propósito analizar las fuerzas magnéticas ejercidas en el rotor, de esta manera se busca la levitación en un eje vertical y así mantener en equilibrio dicho cuerpo ferromagnético.

Durante las pruebas experimentales se observó que se necesitaba fuerzas contrarias para poder llevar a cabo dicha levitación, por lo tanto, se requiere anexar dos electroimanes adicionales para crear ese juego de fuerzas y así ocasionar la levitación de dicho rotor.

En la figura 21, vemos una vista isométrica del prototipo versión 1.0, se puede observar que existe una etapa de control, la cual será explicada en el capítulo siguiente.



**Figura 21.- Vista isométrica del prototipo versión 1.0.**

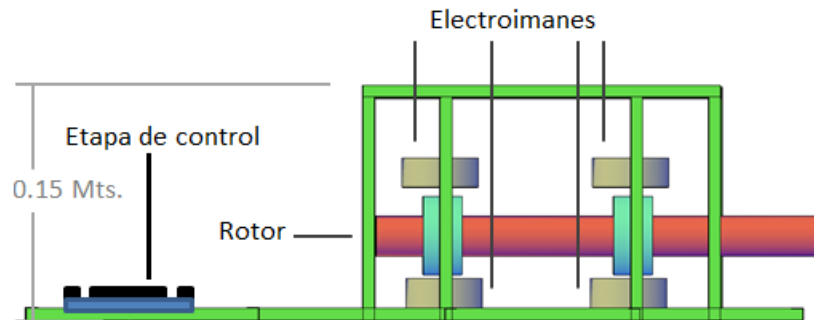
#### **4.1.2.- Prototipo Versión 2.0.**

Al estudiar el primer prototipo nos mostró la necesidad de un juego de fuerzas electromagnéticas, esto debido a que solo se tenía contemplado 2 magnetos solenoides eléctricos por lo que se tomó la decisión de realizar un prototipo versión 2.0 alterno y ver el comportamiento de 4 magnetos solenoides eléctricos.

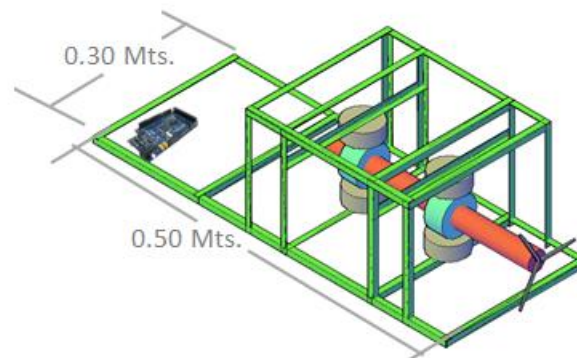
Los componentes del prototipo versión 2.0 son los siguientes:

- Rotor: Acero 4140 de 2" de longitud x 2" de diámetro con una barra de aluminio de 12" de longitud x 1" de diámetro, peso: 1.80 kg.
- Microcontrolador: Arduino Mega 2560
- Electroimán: 4 Magnetos solenoides eléctricos de 65mm, fuerza de 80kg.
- Estructura: Perfil de Aluminio.

En las figuras 22 (vista frontal Prototipo versión 2.0) y 23 (vista isométrica Prototipo versión 2.0), se muestran los dos electroimanes adicionales de la versión anterior, con el propósito de crear fuerzas contrarias y así poder analizar ambas propuestas.



**Figura 22.- Vista frontal del prototipo versión 2.0.**



**Figura 23.- Vista isométrica del prototipo versión 2.0.**

La diferencia entre ambas versiones, además de 2 magnetos solenoides eléctricos de más, es la estructura que es construida enteramente con perfiles de aluminio (Versión 2.0) debido a su peso ligero y resistencia para este tipo de propósito, así como el bajo costo del material.

## 4.2.- Diseño y construcción del sistema de control de electroimanes para la levitación magnética.

El diseño y construcción del sistema de control de electroimanes tiene como propósito principal la levitación magnética del rotor (cuerpo ferromagnético), utilizando la plataforma para el desarrollo de la instrumentación y programación virtual Labview de National Instruments, 2 sensores inductivos con salidas analógicas, un microcontrolador marca Arduino modelo MEGA 2560 como interfaz y una tarjeta principal en donde servirá como tarjeta madre para la conexión de los sensores, etapa de potencia, atenuadores, fuente de poder y las conexiones necesarias para su correcto funcionamiento.

### 4.2.1.- Sistema de Control: Control PID.

El sistema de control PID fue realizado de manera gráfica en la plataforma de instrumentación virtual de Labview (National Instruments) esto es con el propósito de poner a prueba los diferentes tipos de sistemas de control para el prototipo a escala pequeña de levitación. En la figura 24, se muestra el panel frontal completo, en donde se observa la instrumentación virtual del sistema de control PID (cuadro rojo), en el cual se modifican las ganancias (proporcional, integral y derivativo) del sistema de control como mejor sea conveniente y también el rango de salida del medidor de ancho de pulso de 0 a 255.

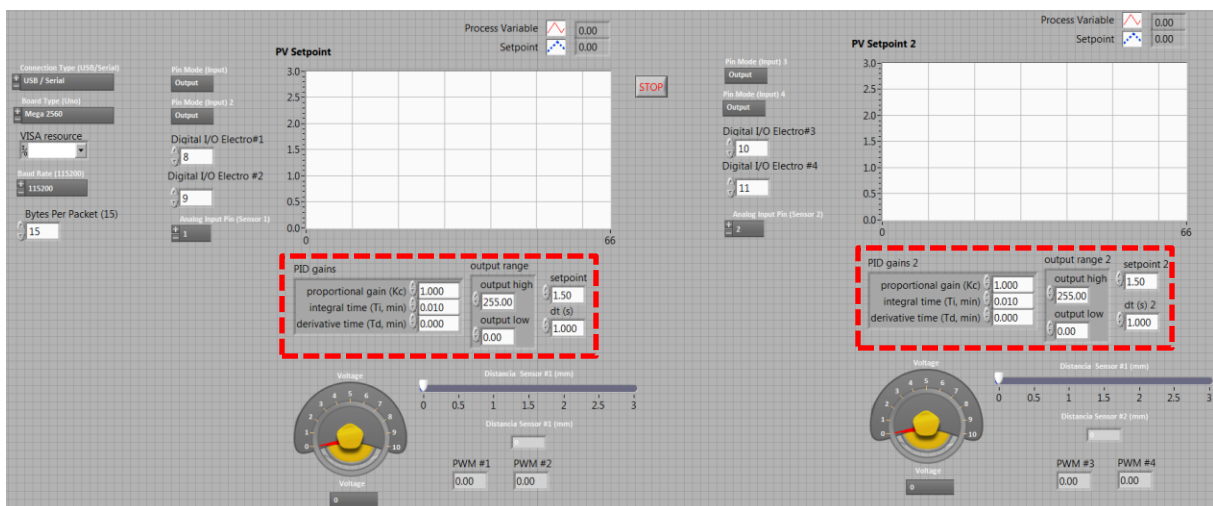


Figura 24.- Vista de panel frontal del sistema de control PID en Labview.

En la figura 25, se muestra el diagrama de bloques completo del sistema de control PID, en color cyan (izquierda) se muestra la interfaz de Arduino MEGA 2560 con Labview en donde inicializa la conexión, el rango de ancho de banda es especificado como “default baud rate” para que sea elegido automáticamente por el microcontrolador Arduino (Arduino firmware), en color rojo se muestra el controlador PID en donde podremos ajustar las ganancias y utilizar un algoritmo PID sencillo o con aplicaciones de control de alta velocidad que requieran un algoritmo con mayor precisión, en nuestro caso utilizaremos tablas características o de estado del sistema completo. (Ver capítulo 5).

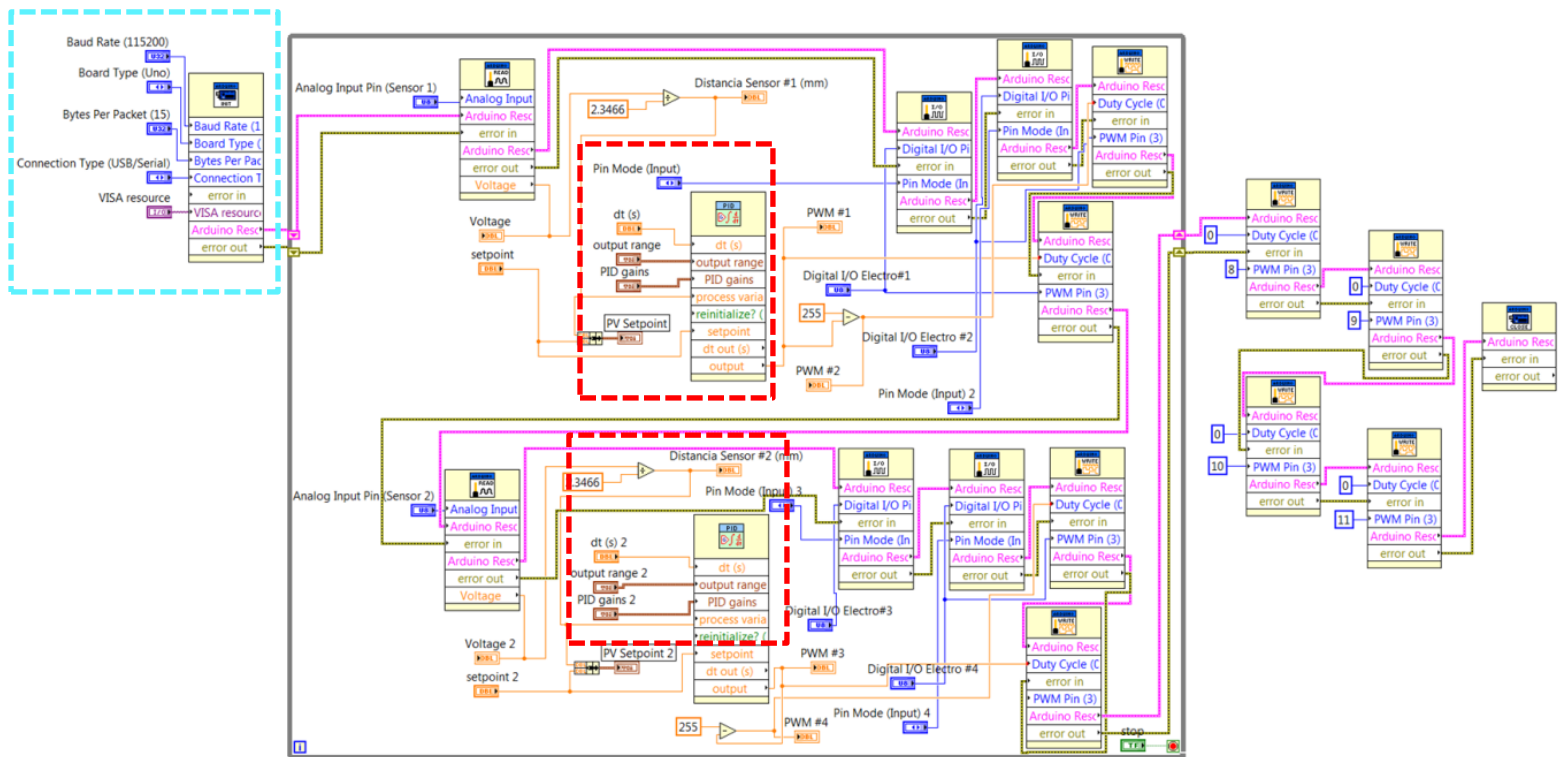


Figura 25.- Vista del diagrama de bloques del sistema de control PID en Labview.

En la figura 26, se muestra el punto de referencia o “setpoint” (marcado en azul) en el panel frontal y en el diagrama de bloques y se necesita agregar en el sistema de control PID, el cual será nuestro parámetro a seguir, en este caso será de 1.5 mm debido a que es la distancia que necesitamos seguir y controlar. En color verde, se observa la gráfica lineal de respuesta y el valor numérico de la distancia a la que se encuentra el rotor de los magnetos solenoides eléctricos, así como en color amarillo se muestra el voltaje que se está suministrando al sensor inductivo con salida analógica, con este voltaje se podrá

determinar, por medio de la curva característica, la distancia que está midiendo dicho sensor, o mejor dicho, la posición del rotor. En la figura 27, se muestra una gráfica del panel frontal en donde se podrá observar la variable de proceso y el punto de referencia (1.5mm) en tiempo real y así estudiar la respuesta obtenida.

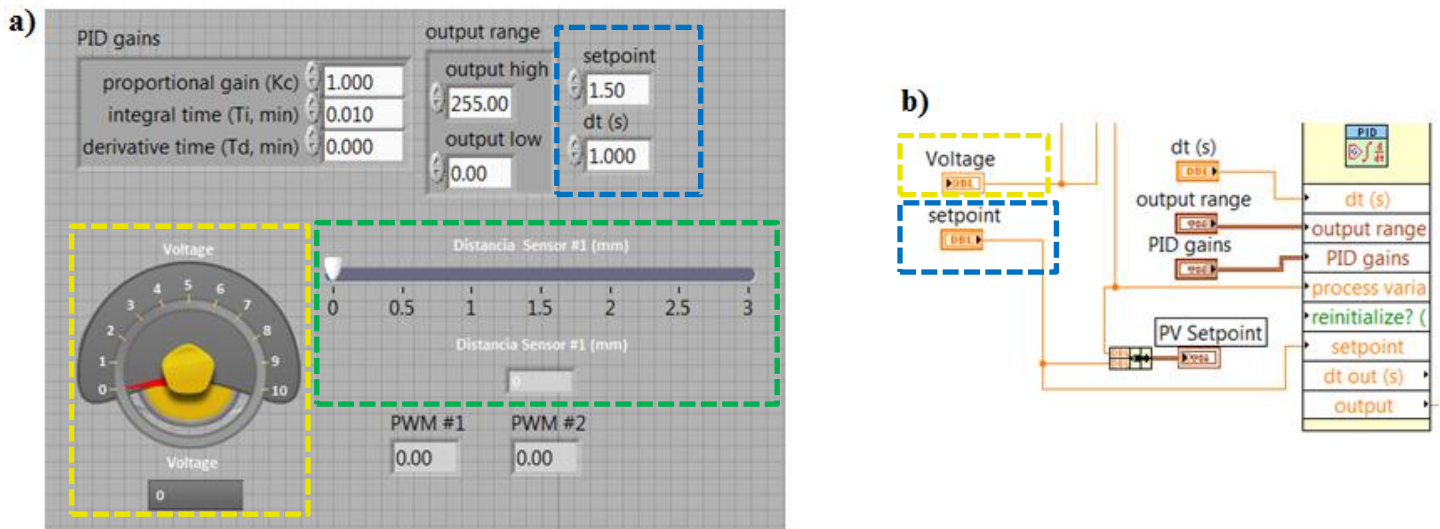


Figura 26.- Izquierda, a).- Panel Frontal. Derecha, b).- Diagrama de bloques.

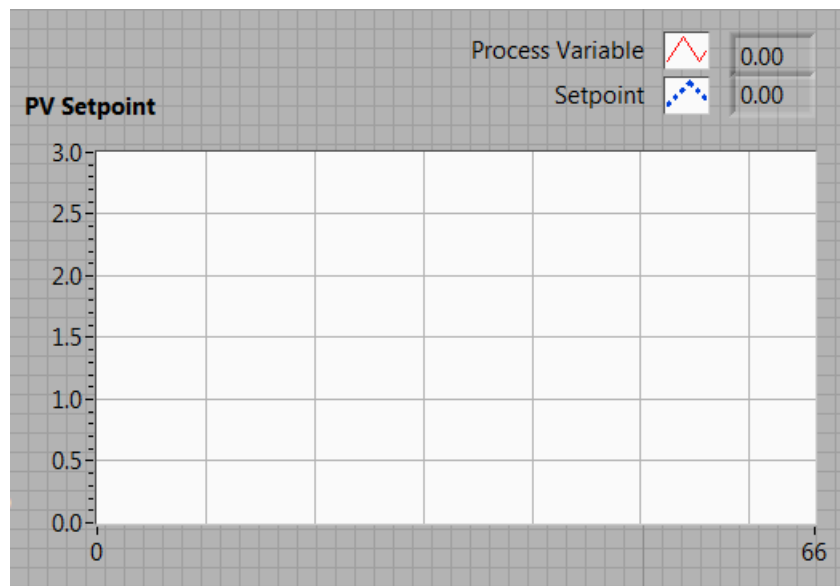


Figura 27.- Gráfica en el panel frontal de la variable de proceso y punto de referencia.

#### 4.2.2.- Sistema de Control: Lógica Difusa.

La lógica difusa en Labview es mucho más sencilla de utilizar y esto es debido a que se utiliza una sección llamada “Diseñador de Sistema Difusos” o en inglés “Fuzzy System Designer” en él se colocan las variables de entrada y salida para su correcto funcionamiento, junto con sus funciones de membresía, reglas de Mamdani a seguir y el método de defusificación a seguir que es por centro de área, dicha información se encuentra en el panel frontal encerrado en color rojo, (ver figura 28). En el recuadro amarillo se coloca el archivo en donde previamente se hizo el diseño de las variables de entrada y salida utilizando el programa “Fuzzy System Designer” por parte de Labview. El recuadro de color verde es la sección en donde se hace la inicialización de la interfaz del microcontrolador Arduino. En color cyan, se observa la gráfica lineal de respuesta y el valor numérico de la distancia a la que se encuentra el rotor de los magnetos solenoides eléctricos y un medidor de voltaje del sensor inductivo con salida analógica, con este voltaje se podrá determinar la posición del rotor. Por último, también aparece la gráfica como plano cartesiano en donde se podrá observar la variable de proceso y el punto de referencia.

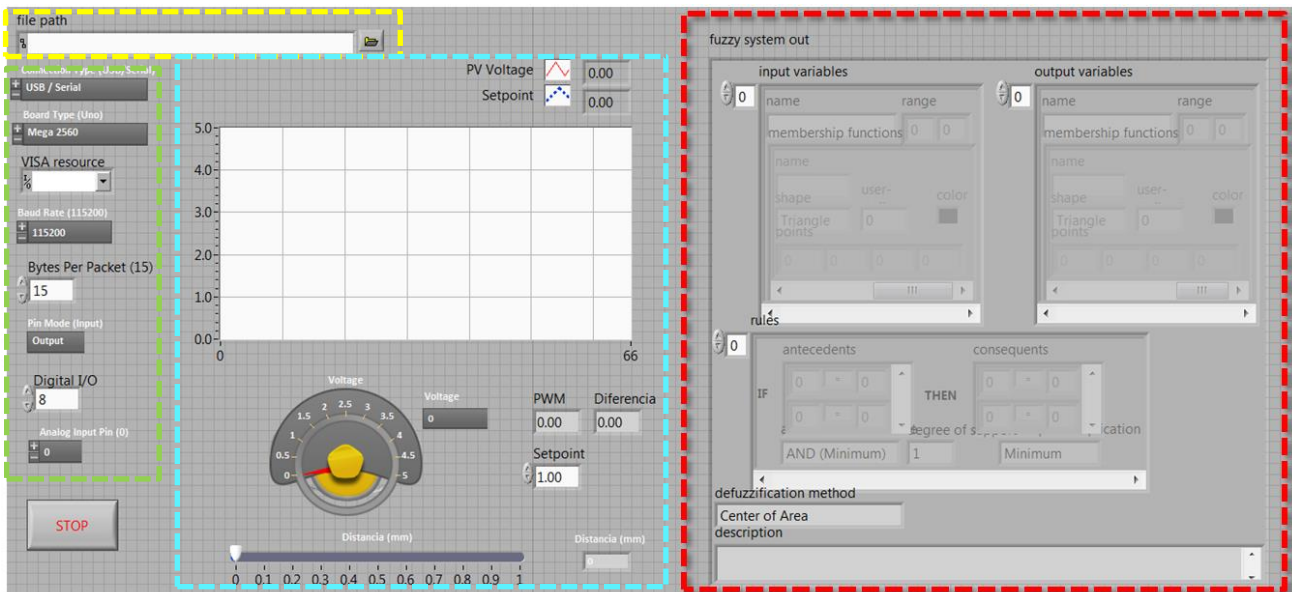


Figura 28.- Vista del panel frontal del sistema de control de lógica difusa.

El Diagrama de bloques del sistema de control de lógica difusa (ver figura 29) en color verde se muestra la interfaz de Arduino MEGA 2560 con Labview, en color rojo se muestra el controlador PID, el cual, lleva integrado las variables de entrada y salida, funciones de membresía, reglas de Mamdani a seguir y el método de defusificación por centro de área. El sistema será SISO debido a que solo tendrá una variable de entrada (diferencia) y una variable de salida (actuador) con el propósito de utilizar un sistema de control más simple y elemental. El rango de salida del medidor de ancho de pulsos será de 0 a 255, al igual que en el sistema de control por PID.

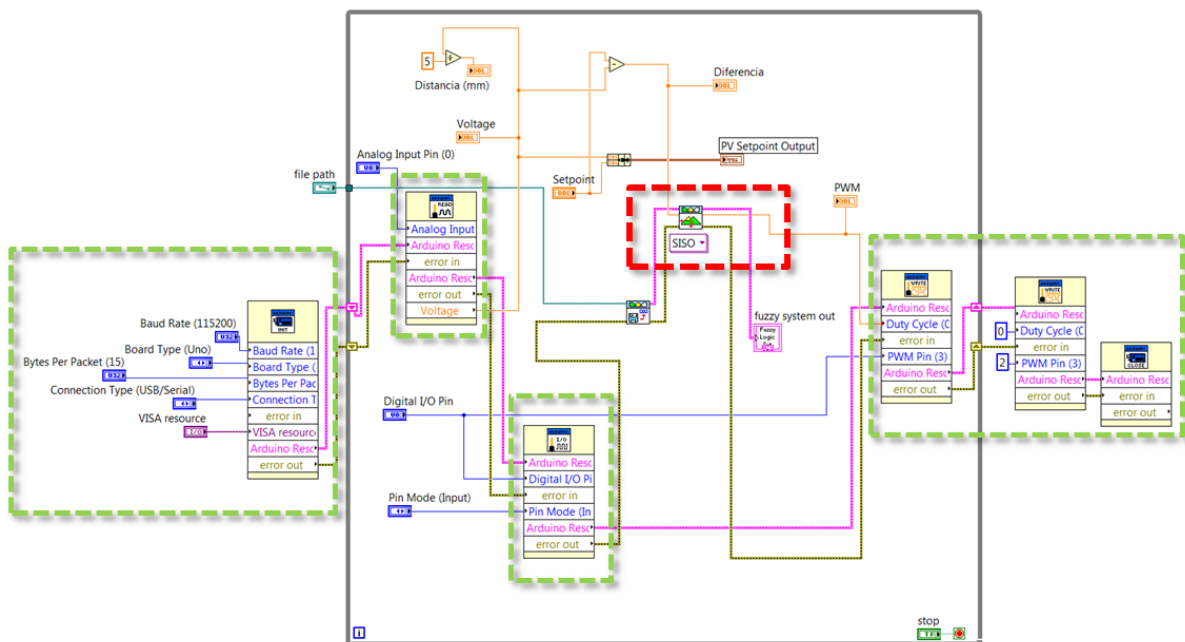
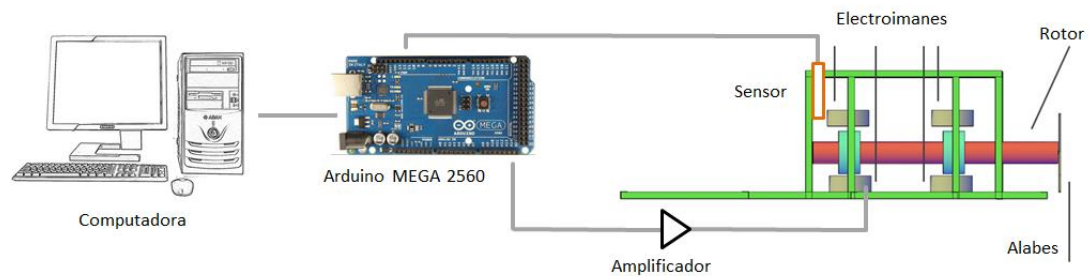


Figura 29.- Vista del diagrama de bloques del sistema de control de lógica difusa.

### 4.3.- Instrumentación del prototipo experimental.

La instrumentación es el procesamiento de la información proveniente de variables físicas de donde se realiza un monitoreo y control de procesos, empleando dispositivos y tecnologías electrónicas, (ver figura 30).

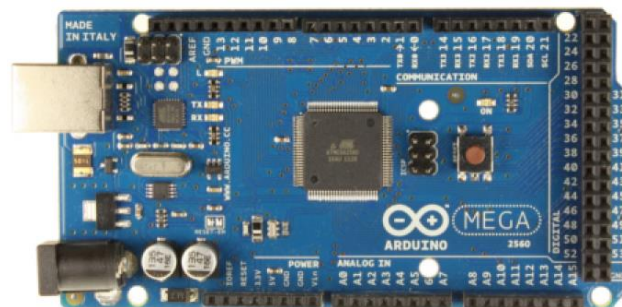


**Figura 30.- Diagrama de instrumentación.**

Existen 3 puntos técnicos que hacen la diferencia en la instrumentación en su etapa de control los cuales se explicaran a continuación:

#### 4.3.1.-Interfaz de control.

El microcontrolador Arduino Mega 2560 (ver figura 31) tiene la facilidad de programación ya que cuenta con un código de programación abierto (open source) lo cual lo convierte en una herramienta sumamente sencilla de programar, (Arduino, 2014). También cuenta con la característica de ser ejecutado y programable con la plataforma de instrumentación virtual Labview, (ver programa de interconexión en anexo A).



**Figura 31.- Microcontrolador Arduino MEGA 2560.**  
(Fuente: Arduino)

Las especificaciones del microcontrolador Arduino Mega 2560 se muestran en la Tabla 4, del cual podemos observar características importantes como son: el voltaje de operación (5 V), el voltaje de entrada limitante (6-20 V), los pins digitales de entrada y salida (54 de los cuales 15 son salidas de PWM) y la velocidad del reloj o Clock speed (16 MHz).

**Tabla 4. Especificaciones del microcontrolador Arduino MEGA 2560.**

Parámetros	Unidades
Voltaje de operación	5 v
Voltaje de entrada (recomendados)	7-12 v
Voltaje de entrada (limites)	6-20 v
Pins digitales E/S	54 15 son salidas PWM
Pins análogos entrada	16
CD corriente por pin E/S	40 mA
CD corriente de 3.3 v por pin	50 mA
Memoria flash	256 Kb
SRAM	8 Kb
EEPROM	4 Kb
Velocidad de reloj (clock speed)	16 MHz

(Fuente: Arduino)

#### ***4.3.2.-Interfaz de control gráfica.***

National Instruments tiene una plataforma de instrumentación grafica llamada Labview, (NI, 2014), la cual se está utilizando para el sistema de control por medio del módulo de PID-Lógica difusa, que por medio del microcontrolador Arduino MEGA 2560 como método de interconexión entre el prototipo experimental y el sistema de control en la computadora. Con esta configuración se podrán obtener la señal de medición por los sensores para las pruebas que se estarán realizando. Consecuentemente, el sistema de computadora en tiempo real (LABVIEW) responderá a la tarjeta de adquisición de datos, que esta a su vez a un amplificador para aumentar o disminuir la corriente de dichos electroimanes para la complementación del equilibrio del objeto ferromagnético (rotor). (Ver figura 32).



**Figura 32.- Vista de corte transversal del rotor del aerogenerador en su etapa de experimentación.**  
(Fuente: (Chiba, 2005))

### ***4.3.3.-Sensores.***

Una parte importante en el desempeño de la levitación magnética son las características de los sensores utilizados dependiendo de la aplicación a utilizar, velocidad, corriente, densidades de flujo, temperatura, desplazamiento, entre otras. Para tener una medición correcta del rotor en movimiento se deben de considerar diferentes aspectos como los que se describen a continuación, (Schweitzer, 2009).

#### ***1.- Rango de medición.***

La señal de salida de un sensor cambia conforme a su efecto físico sobre una función de cantidad medida. El rango el cual la señal de salida puede ser utilizada corresponde al rango aproximado de una correlación lineal entre la cantidad medida y la señal de salida. El rango de medición que se está utilizando es de 0.0 mm a 1.00 mm. simulando la diferencia que hay entre el rotor y el estator de un generador eléctrico para un aerogenerador de baja capacidad que se está estudiando.

#### ***2.- Linealidad.***

La linealidad es usualmente representada como un porcentaje de un rango máximo medido. Se muestra en que cantidad de medición deriva de una relación lineal entre la cantidad medida y la señal de salida.

### 3.- Sensibilidad.

La sensibilidad indica la proporción de la señal de salida sobre la cantidad que debe de ser medida que en cuyo caso debe de ser (1.0 mm), para el sensor de desplazamiento puede ser indicado por mv/mm. La sensibilidad puede ser mejorada por la amplificación electrónica de la señal de salida.

### 4.- Resolución.

Cada sistema de sensores produce perturbaciones de sonido en su señal de salida. El valor de la señal utilizada que puede ser distinguida de la perturbación de sonido se le llama resolución.

### 5.- Rango de frecuencia.

La respuesta lineal de frecuencia es deseada para una aplicación de levitación magnética, especialmente para sensores de desplazamiento como el que se está utilizando. Se debe de considerar una ligera fase de retraso significativa por parte del sensor debido a su frecuencia de “corte” que es usualmente de 3 dB.

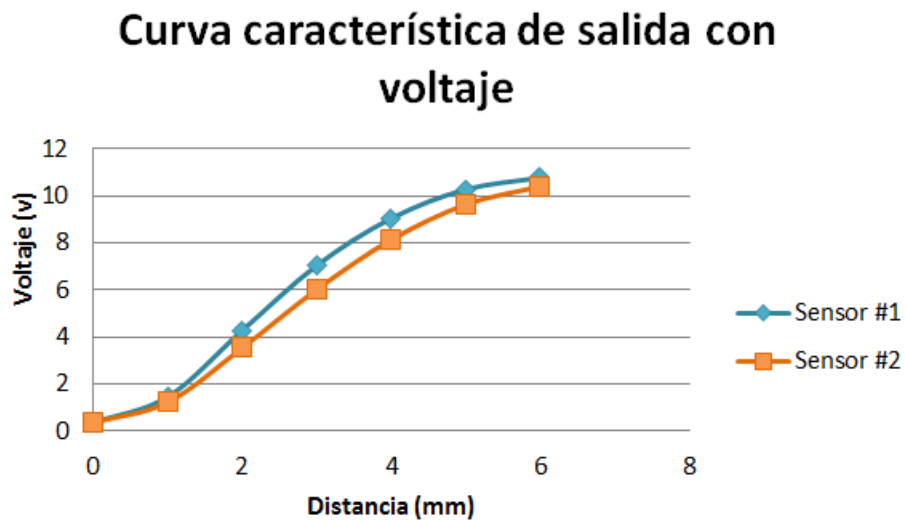
### Sensor inductivo con salida analógica.

Es una clase especial de sensores que sirve para detectar materiales metálicos ferrosos, estos son de gran utilización en la industria. Uno de los principales propósitos es localizar el posicionamiento para detectar la presencia o ausencia de los objetos metálicos. En nuestro caso utilizaremos dos sensores inductivos con salida analógica ambos marca sensopart, modelo IS 512-02 AI (*ver figura 33*), de esta manera se puede determinar la posición del el rotor (recordando que el rotor tiene como material Acero 4140 de 2” de longitud y diámetro con una barra de aluminio de 12” de longitud x 1” de diámetro.) (*Para ficha técnica, ver en anexo B.*)



**Figura 33.- Sensor inductivo con salida analógica, marca sensorpart, modelo IS 512-02 AI.**

La caracterización de los sensores inductivos es de suma importancia, debido a que tiene un rango de voltaje de trabajo de 15 V a 30 V, por lo tanto, el voltaje en el que se esté trabajando la señal obtenida varía. Una vez que es seleccionado el voltaje a utilizar (15 V) se comienza a capturar lecturas de voltajes de trabajo para obtener una curva característica de salida (*ver figura 34*) con voltaje para determinar la distancia que nos indica nuestro sensor inductivo de distancia en milímetros, (*ver tabla 5*).



**Figura 34.- Curva característica de salida con voltaje de los sensores inductivos con salida analógica 1 y 2.**

La caracterización de los sensores inductivos nos servirá para poder indicar en nuestra etapa de control y así poder determinar en qué posición se encuentra el cuerpo ferromagnético (rotor).

En la tabla 5, se muestra los resultados de la caracterización de los dos sensores inductivos con salida analógica en voltaje, el voltaje entrada o suministrado fue de 15 V. por lo que obtenemos un voltaje por la posición en el que se encuentre nuestro cuerpo ferromagnético (rotor).

**Tabla 5.- Tabla de caracterización de sensores, distancia contra voltaje. Izquierda (a) sensor 1. Derecha (b) sensor 2.**

(a)	Sensor 1		(b)	Sensor 2	
	mm	volts		mm	volts
	0	0.36		0	0.37
	1	1.46		1	1.23
	2	4.28		2	3.54
	3	7.04		3	6.02
	4	9.04		4	8.13
	5	10.27		5	9.63
	6	10.77		6	10.4

#### 4.4.- Etapa de potencia

La etapa de potencia es una de las partes más importantes del sistema de control debido a que en ella se encuentra las conexiones principales para su correcto funcionamiento, (ver figura 35 o plano de diagrama de conexión en anexo C). En la tarjeta principal, se encuentra la etapa de potencia que tiene un sistema separado para cada electroimán, el cual consta de un optoacoplador 4N32, el cual recibirá una señal proveniente del microcontrolador y se encargará de separar el circuito y mandar la señal al transistor de potencia 2N5302, que este a su vez manda la corriente y el voltaje proveniente de la etapa de control para activar nuestros magnetos solenoides eléctrico lo suficiente para mantener en equilibrio a nuestro rotor.

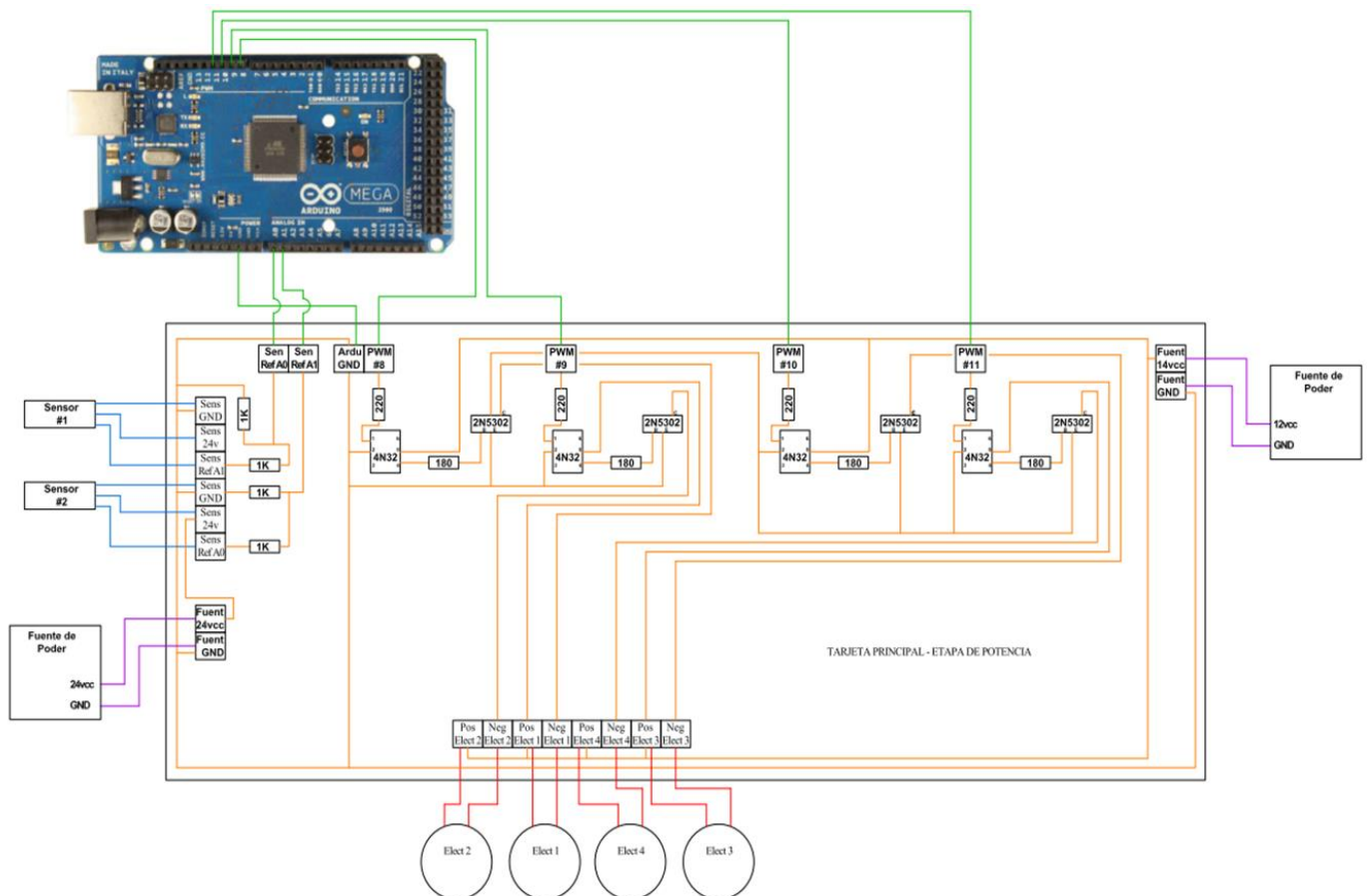
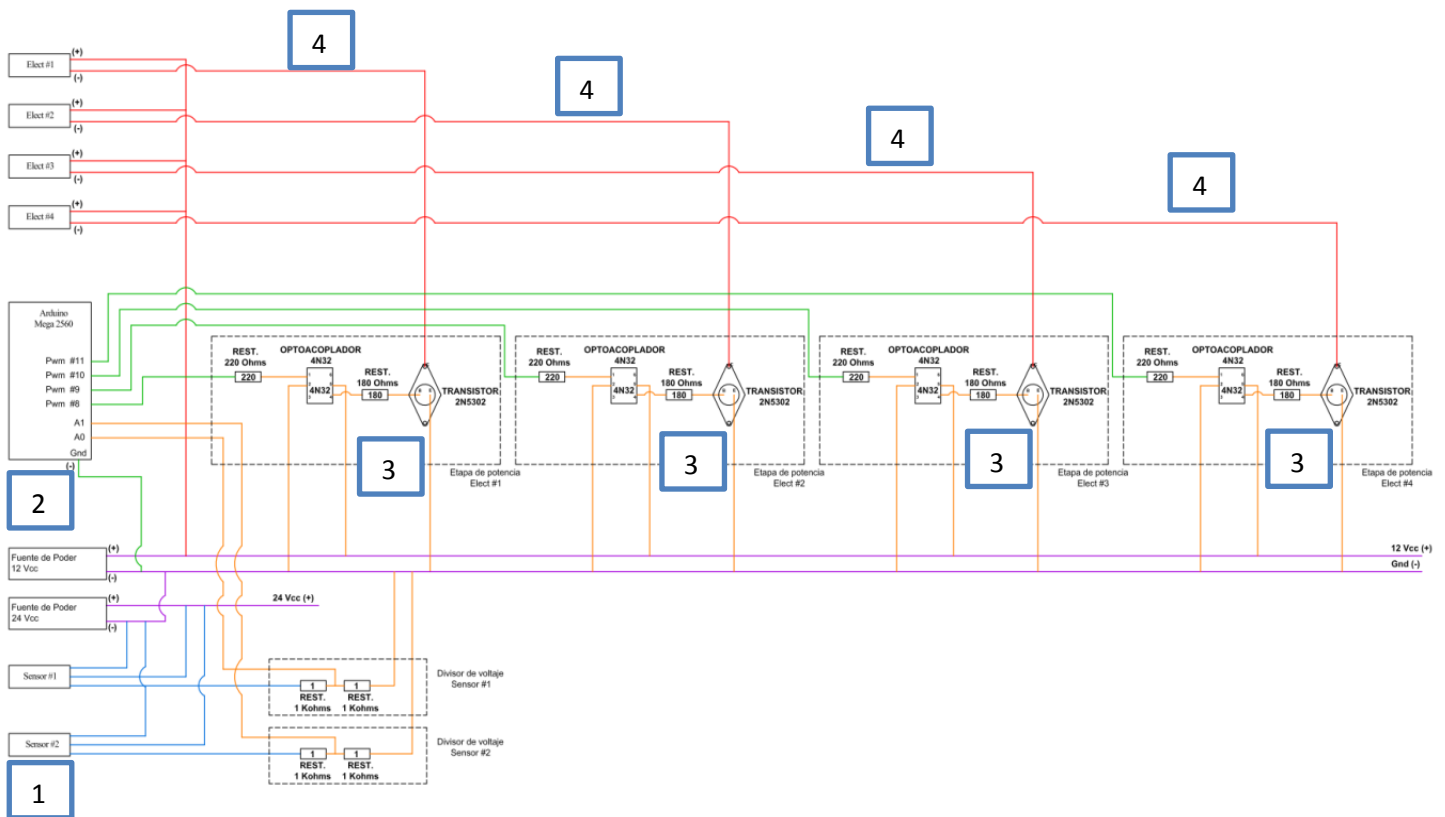


Figura 35.- Tarjeta principal: etapa de potencia, fuente de poder, conexión de sensores y electroimanes.

En la figura 36, se muestra el diagrama unifilar de la tarjeta principal en donde de manera esquemática se muestra la etapa de potencia, fuente de poder, conexiones de sensores y electroimanes. En el punto 1, el sensor inductivo con salida analógica (Sensor 1 y 2) mide la distancia en la que se encuentra el rotor y la señal obtenida pasa por un divisor de voltaje para reducirlo a máximo 5v (debido a las características del microcontrolador) y también pasa por un seguidor de voltaje con el propósito de filtración de la señal para finalizar en las entradas A0 y A1 del microcontrolador Arduino MEGA 2560 respectivamente, punto 2. Una vez que se realiza la interfaz al ordenador y este a su vez a la plataforma de Labview, se ejecuta el sistema de control (PID o Lógica difusa), la señal de salida y/o respuesta pasa nuevamente por la interfaz de Arduino para mandar el resultado obtenido y comunicarlo a cada magneto solenoide eléctrico, pero antes, necesita amplificar la señal de respuesta (PWM 08, 09, 10 y 11). En color verde y punto 3, aparece la conexión del microcontrolador Arduino a cada etapa de potencia correspondiente a cada electroimán (Elect 1, 2, 3 y 4), punto 4.



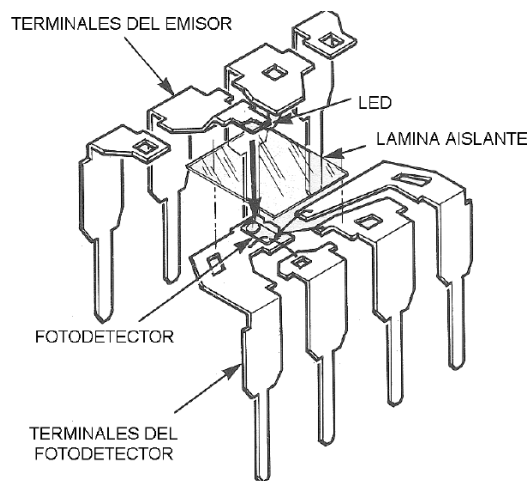
**Figura 36.- Diagrama Unifilar de Etapa de Potencia**

Una vez visto el diagrama de la tarjeta principal se necesita explicar en específico los componentes principales de la etapa de potencia son: el optoacoplador y el transistor. El optoacoplador funciona como un interruptor activado mediante la luz por un diodo LED que satura un componente optoelectrónico. El transistor es un dispositivo que es utilizado para producir una señal de salida en respuesta a otra señal de entrada y cumple como funciones de oscilador, rectificador y para este caso como amplificador.

### Optoacoplador

El optoacoplador o acoplador óptico es un dispositivo que ofrece a los diseñadores electrónicos una mayor libertad para diseñar circuitos y sistemas. La operación está basada en la detección de luz emitida. La entrada del acoplador está conectada a un emisor de luz y la salida es un foto-detector. Los dos elementos están separados por un aislante transparente, dentro de un empaque que lo aísla de la luz exterior (*ver figura 37, para ficha técnica ver anexo B*).

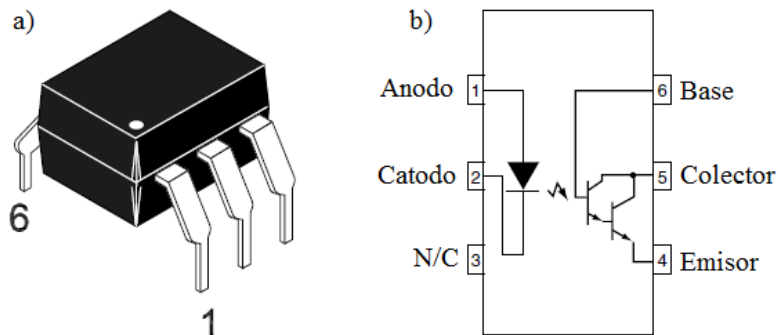
Básicamente es un dispositivo de emisión y recepción que funciona como un interruptor activado mediante la luz emitida por un diodo LED que satura un componente optoelectrónico, normalmente en forma de fototransistor.



**Figura 37.- Vista interna de un optoacoplador.**

Esta estructura produce un elemento que permite el acoplamiento de señales de dos tipos de circuitos electrónicos independientes y totalmente aislados entre sí, según el

encapsulado de estos dispositivos pueden tener un aislamiento hasta de 3,500 volts, (ver figura 38). (Para ficha técnica, ver en anexos.)



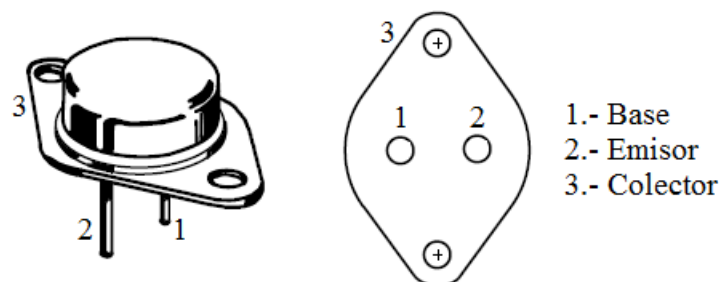
**Figura 38.- Optoacoplador: a) Encapsulado típico, b) Esquema eléctrico.**

Al encapsular un emisor y un detector óptico, la relación óptica siempre está establecida y esto hace que la naturaleza de uso sea totalmente electrónica. Esto elimina la necesidad de tener conocimientos de óptica para el usuario. Por lo tanto para una efectiva aplicación solo hace falta conocer algunas características eléctricas, capacidades y limitaciones del emisor y el detector.

### Transistor

El transistor es un dispositivo semiconductor de tres capas y puede ser transistor NPN o transistor PNP, el transistor utilizado consta de dos capas de material tipo “N” y una de material tipo “P”, (Boylestad, 2009).

El transistor 2N5302G utilizado es un NPN de silicón de alta potencia de 30 amperes, 60 volts y 200 watts, (ver figura 39 o para ficha técnica, ver en anexo B)



**Figura 39.- Transistor 2N5302G, NPN de alta potencia.**

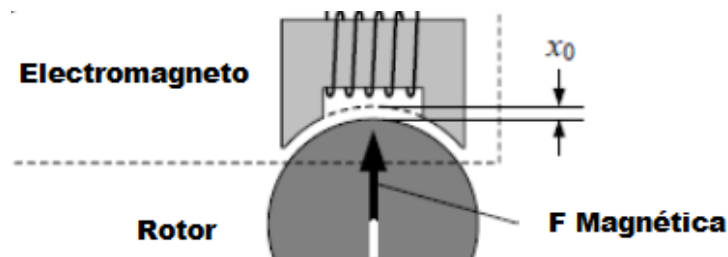
## ***CAPÍTULO 5.- Estudio experimental***

### ***5.1.- Sistema de control de electroimanes para la levitación magnética.***

El estudio experimental consiste la implementación y evaluación de un sistema de control PID y lógica difusa podremos determinar cuál sistema de control es el más óptimo y adecuado para este tipo de sistemas.

El control de los magnetos solenoides eléctricos es un sistema el cual actúa el proceso sobre la señal de entrada de los sensores inductivos con salidas analógicas para dar como resultado una señal independiente a la señal de entrada, pero basada en la primera. Esto significa que el microcontrolador al recibir la señal de ambos sensores, determina cual será el siguiente paso en el sistema de control (PID o lógica difusa), para luego regresar la señal a la misma interfaz de control (microcontrolador) ya con la respuesta dará el balance y equilibrio correcto.

Se realizaron 3 pruebas con distancias en  $x_0$  de 1 mm, 3 mm y 6 mm, (ver figura 40). Si se centra el rotor o pieza ferromagnética entre ambos electromagnetos las distancias para ambas partes en  $x_0$  sería de 0.5mm, 1.5mm y 3mm.



**Figura 40.- Distancia  $x_0$  de 1 mm, 3 mm y 6 mm del rotor con el magneto solenoide eléctrico. (Fuente: (Chiba, 2005))**

Para la realización de las pruebas se utilizó un medidor de campos eléctricos marca Extech Instruments de 8 GHz (ver figura 41, para ficha técnica ver anexo B), el cual nos entregó las mediciones de los parámetros de salida: campo eléctrico, campo magnético y densidad de potencia de los magnetos solenoides eléctricos, (ver tabla 6).



Figura 41.- Medidor de campos eléctricos: 8 GHz EMF meter.

Tabla 6.- Mediciones de los parámetros de salida: campo eléctrico, campo magnético y densidad de potencia de los magnetos solenoides eléctricos.

Campo Eléctrico		Campo Magnético		Densidad de Potencia	
Volts	(v/m)	Volts	(mA/m)	Volts	( $\mu\text{w}/\text{cm}^2$ )
0	0.000	0	0.000	0	0.000
1	0.444	1	1.191	1	0.047
2	0.728	2	1.947	2	0.131
3	0.972	3	2.595	3	0.239
4	1.193	4	3.182	4	0.366
5	1.398	5	3.727	5	0.509
6	1.592	6	4.241	6	0.667
7	1.777	7	4.731	7	0.838
8	1.954	8	5.201	8	1.022
9	2.125	9	5.653	9	1.216
10	2.289	10	6.087	10	1.420
11	2.450	11	6.512	11	1.635
12	2.607	12	6.927	12	1.860

Por medio del software Origin Pro 9.1 (Origin, 2013), se determinaron las ecuaciones, curvas características no lineales, gráfica residual, entre otros dato, de cada uno de los parámetros de salida para nuestra planta: campo eléctrico, campo magnético y densidad de potencia, (*ver detalles en anexo D*). Estas mediciones nos ayudan para determinar y utilizar las tablas de transición o tablas de estado para el sistema de control PID y ser utilizarlas como técnica de sintonización. Las tablas de transición muestran el estado actual de la planta y cuál será el siguiente paso consecutivo.

$$\text{Ecuación del Campo Magnético: } y = (1.19117)(x)^{0.70847} \text{----- [Ec. 08]}$$

donde:

$x$  = volts [v].

$y$  = Campo Magnético [mA/m]

A continuación se muestra en resumen las 7 tablas de estado que representan el funcionamiento del sistema de control como técnica de sintonización:

**Tabla 7.- Tabla de transición del sistema de control como técnica de sintonización.**



El magneto solenoide eléctrico tiene como parámetros de entrada 10 posiciones y cada una representa un parámetro de salida porcentual del campo magnético de los electroimanes (Tabla 1 - Planta), el cual, la posición 0 equivale a 0% equivalente a su vez a 0 mA/m de campo magnético, la posición 5 equivale a 50% equivalente a su vez a 3.727 mA/m del campo magnético y así sucesivamente hasta llegar a la posición 10 representando el 100% y su campo magnético es de 6.627 mA/m. Por consiguiente, se realiza la igualación del campo magnético porcentual a la distancia de medición del sensor sobre el rotor en milímetros (Tabla 2 - Sensor) para a su vez pasar al acoplamiento e igualación de la salida del sensor a los requerimientos del sensor a la entrada del sistema de control (Tabla 3 – Acoplamiento).

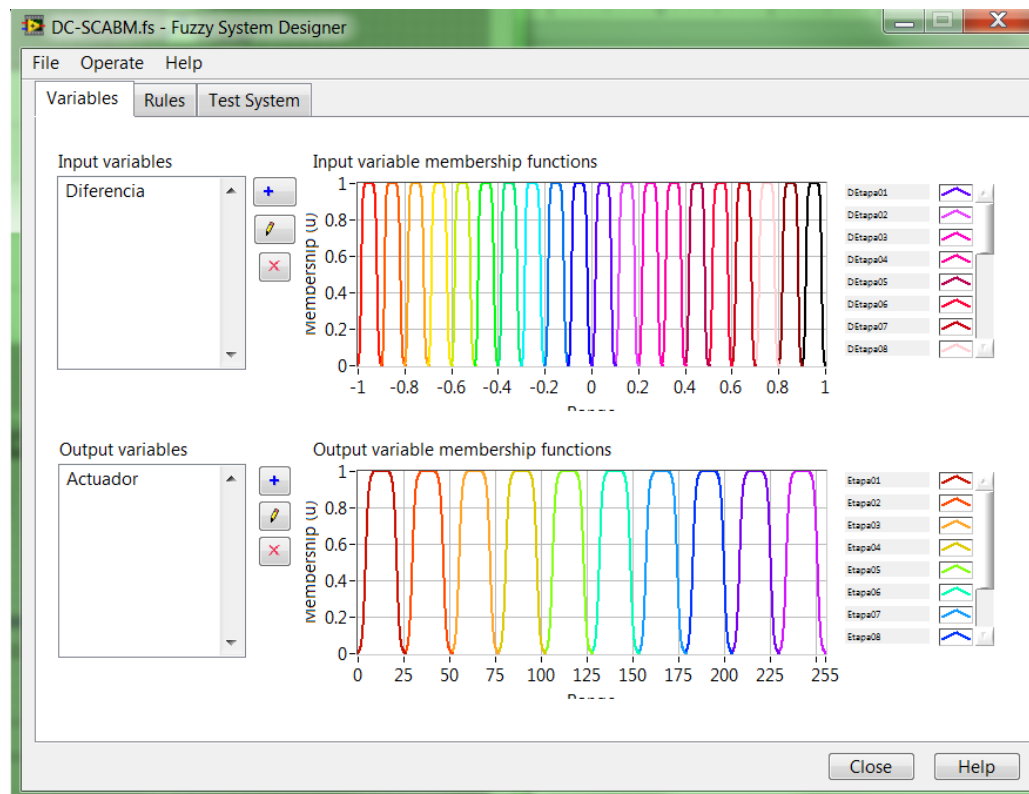
La tabla característica del convertir analógico-digital (ADC) a usar, convierte los volts en un parámetro decimal denominado PWM y con el determinar el ancho de pulso a entregar de 0 a 255 al electroimán, al convertir en número decimal, el PWM es necesario convertirlo a número hexadecimal debido al lenguaje digital (Tabla 4 – ADC). La entrada al setpoint en valor representativo de distancia en milímetros es la entrada deseada o de referencia que queremos que este en equilibrio nuestro rotor o cuerpo ferromagnético, para este caso, nuestra referencia es de 0.5 mm. (Tabla 5 – Setpoint). La tabla característica del convertidor digital-analógico a usar convierte nuestro número de referencia de número hexadecimal dentro del sistema a un voltaje de referencia para determinar la distancia en la que se desea estar (Tabla 6 – DAC).

El acoplamiento e igualación de la salida DAC a los requerimientos del sistema del control vuelve a seleccionar el parámetro de entrada a los magnetos solenoides (Tabla 7 – Acoplamiento) para a su vez regresar al mismo punto de partida, de tal manera buscando siempre el equilibrio del sistema.

#### *Sistema de control por Lógica Difusa*

La programación se realizó enteramente en la plataforma y entorno de desarrollo para diseñar sistemas, con un lenguaje de programación visual gráfico de National Instruments Labview, utilizando la herramienta “Diseñador de Sistema Difusos” o en inglés “Fuzzy System Designer”.

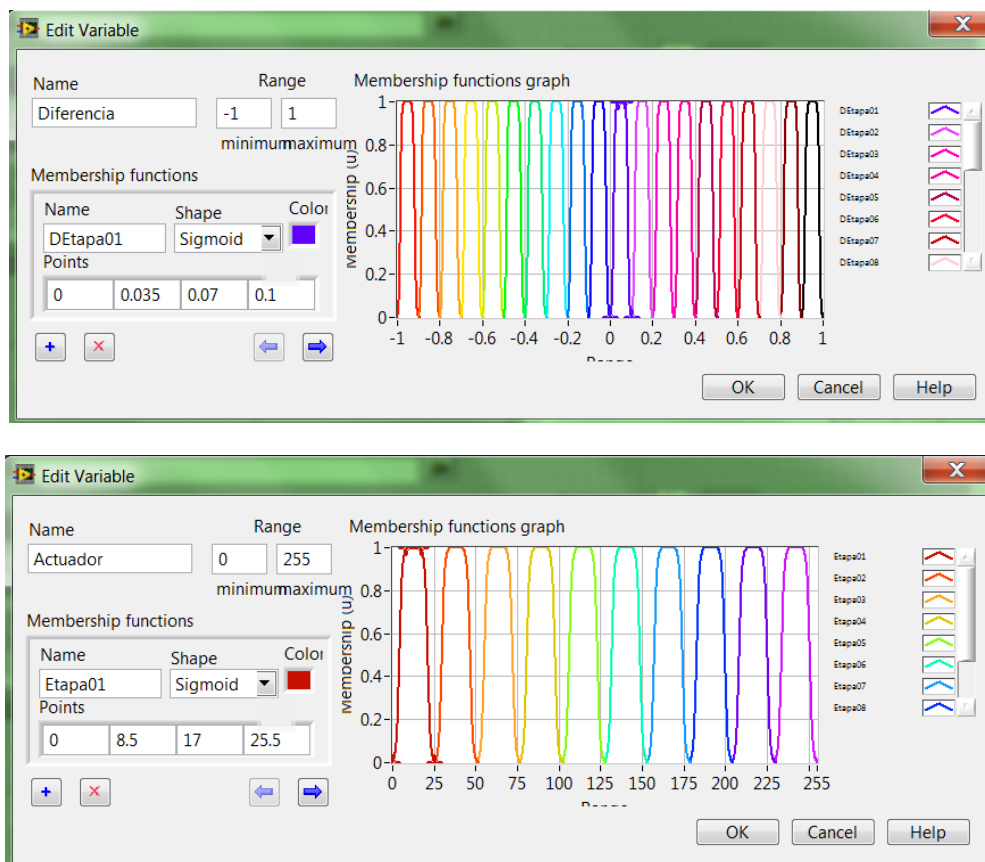
Primeramente se necesitan declarar que tipo de sistema se estará utilizando si es SISO o MIMO, a lo cual por su propia sencillez se recomienda utilizar el número de variables más bajo posible, así que por la facilidad de la programación se concentró en el sistema SISO, con el nombre de la variable de entrada “Diferencia” siendo la resultante de la diferencia de distancia entre el rotor y el electroimán y no debe de pasar más allá de 1.0 mm para la primera prueba de 3 en total (1 mm, 3 mm y 6 mm). La variable de salida será “Actuador” siendo esta variable la responsable de mandar la señal a los magnetos solenoides eléctricos, (ver figura 42).



**Figura 42.- Variables de entrada/salida en el Sistema de Diseño de Lógica Difusa.**

En la figura 42, se muestra las variables de entrada y de salida, así como las variables de entrada para las funciones de membresía (grafica en múltiples colores). Las funciones de membresía representan el grado de pertenencia de un elemento a un subconjunto definido por una etiqueta. Dichas funciones de membresía tanto de entrada como de salida tienen que ser definidas, entre más funciones de membresía existan, habrá más finesa y una mayor precisión.

Al determinar la función de membresía se necesita primeramente elegir entre una gran variedad de formas para las funciones de membresía, las más comunes son: tipo triangular, forma “S”, trapezoidal y singleton. Para nuestro caso, se seleccionó la forma tipo “S” o Sigmoid, esto es con la finalidad de tener una mayor precisión debido a que requiere de más intervalos que los demás (*ver figura 43*), incluso se determina que nombre llevara la variable de entrada o de salida, así como el rango que se estará utilizando. En el caso de la variable de salida se determinó 1.0 mm debido a que es la distancia y la diferencia que se está utilizando para mantener en equilibrio. Para el caso de la variable de salida es de 0 a 255 por los pulsos que nos arroja o presenta el módulo de ancho de pulsos (PWM). En la parte derecha de las *figura 43*, se puede verificar el tipo de forma de la gráfica de las funciones de membresía que son actualizadas automáticamente cada vez que sus puntos o intervalos son modificados. El color de cada una de las mismas graficas fue modificado para una mejor visibilidad.



**Figura 43.- Variable de entrada/salida: Funciones de membresía con rango, puntos e intervalos, tipo de forma de gráfica.**

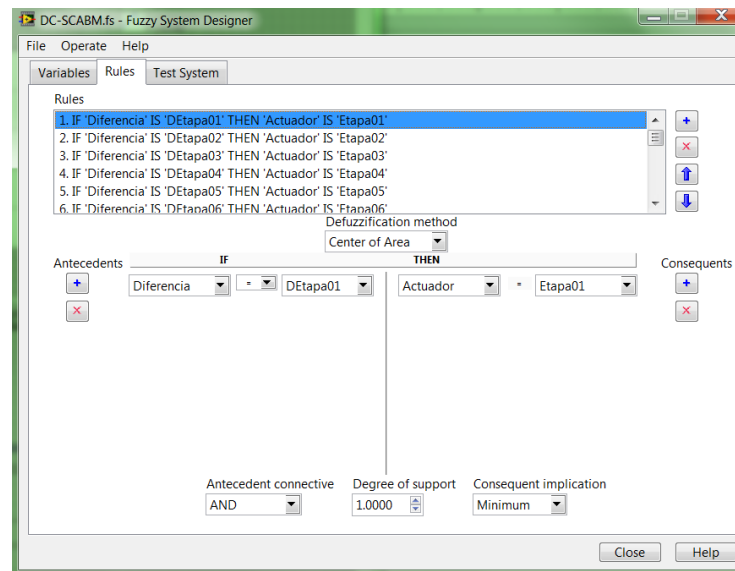
Las funciones de membresía de entrada y salida junto con sus intervalos son llamadas por etapas para determinar en qué etapa está funcionando nuestro sistema de control. Si tenemos que  $x_0 = 0.35$ , quiere decir que su función de membresía de entrada se encuentra en la “Etapa 4”, intervalos (A=0.300, B=0.335, C=0.370 y D=0.400), por lo tanto su función de membresía de salida es la “Etapa 4” y sus intervalos ya están asignados (A=76.500, B=85.000, C=93.500 y D=102.000). Por consiguiente, nuestra variable de salida “Actuador” sabrá que función de membresía utilizar y así realizar su cometido, (*ver tabla 8*).

**Tabla 8.- Funciones de membresía de entrada/salida con sus intervalos correspondientes.**

FUNCIONES DE MEMBRESIA DE ENTRADA					FUNCIONES DE MEMBRESIA DE SALIDA						
		INTERVALOS						INTERVALOS			
		A	B	C	D			A	B	C	D
Etapa 1	1	0.000	0.035	0.070	0.100	Etapa 1	1	0.000	8.500	17.000	25.500
Etapa 2	2	0.100	0.135	0.170	0.200	Etapa 2	2	25.500	34.000	42.500	51.000
Etapa 3	3	0.200	0.235	0.270	0.300	Etapa 3	3	51.000	59.500	68.000	76.500
Etapa 4	4	0.300	0.335	0.370	0.400	Etapa 4	4	76.500	85.000	93.500	102.000
Etapa 5	5	0.400	0.435	0.470	0.500	Etapa 5	5	102.000	110.500	119.000	127.500
Etapa 6	6	0.500	0.535	0.570	0.600	Etapa 6	6	127.500	136.000	144.500	153.000
Etapa 7	7	0.600	0.635	0.670	0.700	Etapa 7	7	153.000	161.500	170.000	178.500
Etapa 8	8	0.700	0.735	0.770	0.800	Etapa 8	8	178.500	187.000	195.500	204.000
Etapa 9	9	0.800	0.835	0.870	0.900	Etapa 9	9	204.000	212.500	221.000	229.500
Etapa 10	10	0.900	0.935	0.970	1.000	Etapa 10	10	229.500	238.000	246.500	255.000
Etapa -1	1	-0.100	-0.070	-0.035	0.000						
Etapa -2	2	-0.200	-0.170	-0.135	-0.100						
Etapa -3	3	-0.300	-0.270	-0.235	-0.200						
Etapa -4	4	-0.400	-0.370	-0.335	-0.300						
Etapa -5	5	-0.500	-0.470	-0.435	-0.400						
Etapa -6	6	-0.600	-0.570	-0.535	-0.500						
Etapa -7	7	-0.700	-0.670	-0.635	-0.600						
Etapa -8	8	-0.800	-0.770	-0.735	-0.700						
Etapa -9	9	-0.900	-0.870	-0.835	-0.800						
Etapa -10	10	-1.000	-0.970	-0.935	-0.900						

Una vez realizado y puesto las variables con sus funciones de membresía con rango, puntos e intervalos y tipo de forma, se necesita determinar las reglas difusas, recordando que los controladores difusos usan reglas, estas combinan uno o más conjuntos borrosos de entrada llamados *antecedentes o premisas* y le asocian un conjunto borroso de salida llamado *consecuente o consecuencia*. Involucran a conjuntos difusos, lógica difusa e inferencia difusa.

Las reglas difusas de Mamdani (*ver figura 44*) son las reglas difusas más comunes en un sistema de lógica difusa, en cuyo interior la información se representa y procesa empleando la lógica difusa. Cada variable de entrada y cada variable de salida se representan al interior del sistema por medio de una variable lingüística. La función de difusor es tomar las entradas concretas y convertirlas en conjuntos difusos; estos conjuntos serán procesados por el motor de inferencia, empleando la información contenida en la base de reglas para producir un grupo de conjuntos difusos que serán tomadas por el congresor para producir una salida concreta.



**Figura 44.- Reglas de Mamdani.**

Ahora es posible poner a prueba el sistema una vez que ya fueron definidas las reglas que van a regir al sistema y de esa manera determinar si existe un error en alguna de las funciones de membresía o simplemente modificar algún parámetro o intervalo y así definir una mayor precisión. Hay que recordar que entre más funciones de membresía existan mayores oportunidades tendrá la lógica difusa de determinar una mejor precisión del sistema.

## 5.2.- Procesamiento y análisis de la información.

El sistema de control por lógica difusa fue completado con las variables de entrada y salida, funciones de membresía, rangos, puntos e intervalos, tipo de forma y reglas de Mamdani. En la figura 45, se muestra el sistema puesto en marcha y a prueba, aquí se puede apreciar el valor de la variable de salida siendo para esta parte de 11.2088 del PWM como suministro para el magneto solenoide eléctrico, y esto fue debido a que la variable de entrada “diferencia” se encuentra en la etapa 01 de nuestras funciones de membresía. La regla que fue cumplida según los parámetros en los que se encuentra fue:

*IF 'Diferencia' IS 'Etapa01' THEN 'Actuador' IS 'Etapa01'*

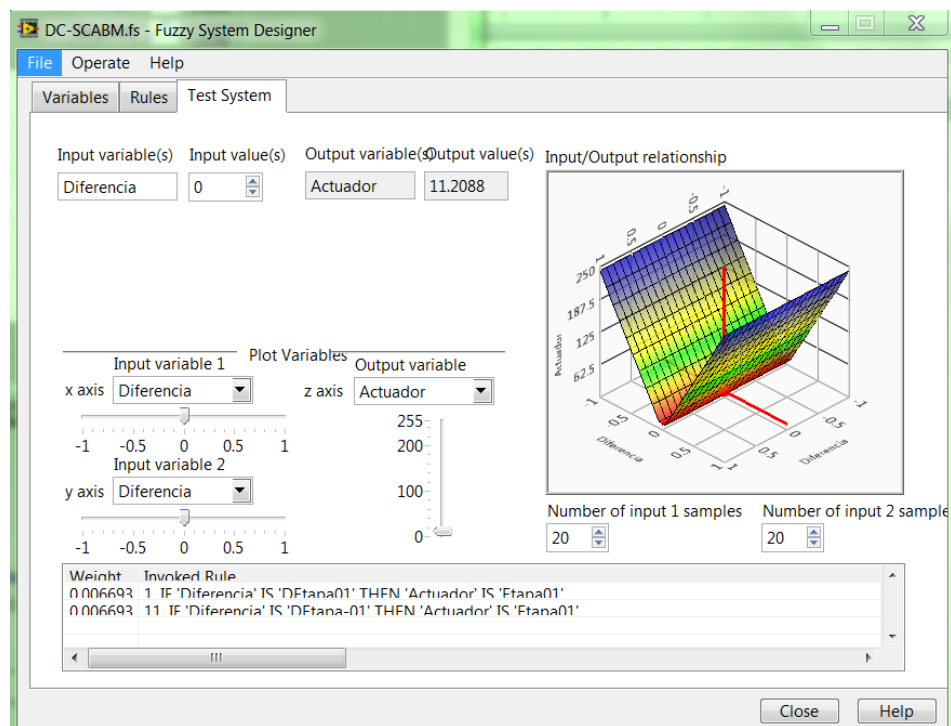
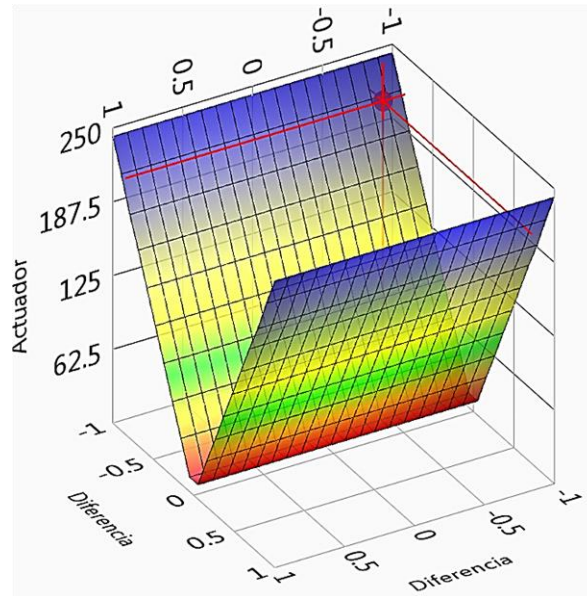


Figura 45.-Pantalla del sistema de prueba con gráfica de la relación de entrada/salida/

En la figura 46, se puede apreciar con mejor visibilidad la gráfica en 3 dimensiones con la variable de entrada (diferencia) y la variable de salida (actuador). Se aprecia una gráfica de triángulo invertido en donde las funciones de membresía determinan en que rango estará trabajando nuestro sistema de control.



**Figura 46.- Grafica en tres dimensiones con la relación entrada/salida.**

Sin embargo, para la prueba con  $x_0$  de 1 mm no era suficientemente rápido la reacción de respuesta en ambos sistemas de control, por lo tanto, debido a que el microcontrolador era muy lento. Por otra parte, para las pruebas con  $x_0$  de 3 mm y 6mm los sensores inductivos de distancia con salida analógica cubren el rango de medición pero para los magnetos solenoides eléctricos no eran suficientemente fuerte el campo magnético para atraer el rotor.

## ***CAPÍTULO 6.- Conclusiones.***

### ***6.1.- Conclusiones.***

Una de las soluciones más factibles para el suministro de energía eléctrica es la energía eólica, en ella encontramos que tiene un mínimo impacto al medio ambiente con gases ni agrava el efecto invernadero, el precio de la energía eléctrica producida por ese medio resulta competitivo con otras formas de generación de energía renovable. La opción de un aerogenerador de baja capacidad con levitación magnética puede ser una opción viable para las residencias de Baja California, debido a que durante la etapa de arranque para empezar a generar energía eléctrica sería menor a los aerogeneradores convencionales.

El estudio de ambos sistemas de control lógica difusa y PID, en donde se realizaron las pruebas de levitación de un rotor por medio de electroimanes en un solo eje y utilizando dos sensores inductivos con salida analógica para su de medición y retroalimentación e integrando una tarjeta principal en donde nos lleva a la facilidad de programación sin tener que ser tan relevante el utilizar técnicas de sintonización por parte del sistema de control por lógica difusa, el cual lo hace más práctico, sin embargo el sistema de control por PID es un sistema antiguo y de mucha utilidad, por otro lado, los electroimanes no son factibles a la geometría de la pieza de levitación. Ambos sistemas fueron probados a 3 distancias diferentes entre el rotor y el magneto solenoide eléctrico (1, 3 y 6 mm respectivamente).

El prototipo versión 1.0 tuvo como propósito analizar las fuerzas magnéticas ejercidas en el rotor, durante las pruebas experimentales se observó que se necesitaba fuerzas contrarias para poder llevar a cabo dicha levitación, por lo tanto, se requiere anexar dos electroimanes adicionales para crear ese juego de fuerzas y así ocasionar la levitación de dicho rotor.

Los electroimanes necesitaban mayor campo magnético para realizar la levitación del rotor para la versión 2.0 a 3 y 6 mm de separación entre el cilindro y los electroimanes. En la prueba con una distancia de 1 mm se logró la levitación magnética en un eje vertical pero el tiempo de respuesta no fue el óptimo.

Si se quiere innovar en los sistemas de energía eólica y utilizar sistemas de control alternativos el sistema de control por lógica difusa es una opción viable debido a su sencillez y fácil manejo, debido a que no necesita de un algoritmo matemático para su utilización. Sin embargo, el sistema de control PID es el más utilizado y más confiable para muchos ingenieros de esta rama, por consecuencia, no podemos descartar y dejar de lado esta opción.

## **6.2.- Recomendaciones.**

La recomendación importante sobre el estudio de esta tesis es programar el microcontrolador Arduino MEGA 2560 de manera embebida para reducir el tiempo de respuesta y así no sufrir de retrasos en la interfaz de conexión.

Las bases que se presentaron en este trabajo, son solo una parte de un proyecto mucho más grande, para poder trascender en el área de energías renovables es necesario tener un equipo multidisciplinario, con el cual uno pueda apoyarse para innovar con tecnología de punta. Aunado a esto, el aporte financiero a la innovación tecnológica es de suma importancia, ya que sin recursos financieros es muy difícil el poder desarrollar tecnología nueva.

Las herramientas de diseño y la interfaz gráfica es de buena ayuda, pero una de las recomendaciones sería tener la programación del microcontrolador de manera embebida, de esta manera bajaríamos el tiempo de respuesta para los magnetos solenoides eléctricos o en su defecto final, baleros magnéticos activos.

El legado en el área de control es importante, ya que los investigadores que estén empezando con este tipo de proyectos en aerogeneración podrán tener una base en los sistemas de control y así no empezar de cero.

## **6.3.- Trabajos futuros.**

Los investigadores comprometidos en los sistemas de energía renovables no dejen de seguir innovando e investigando opciones viables para las energías verdes y el hecho de no tener un panorama más claro con esta investigación no quiere decir que todo fue en vano

y esto debido a que se ha dejado un legado en el área de control para futuro proyectos y se tendrá camino más trazado.

A continuación se presenta el siguiente decálogo de puntos como aporte para trabajos a corto, mediano y largo plazo y se describen a continuación:

1. Comparación de sistemas de control (PID y Lógica Difusa).
2. Legado en el área de control para futuros proyectos (Prototipo Experimental 1.0 y 2.0).
3. Desarrollo de sistemas de control por Lógica Difusa sin necesidad de realizar un algoritmo matemático de dicha planta.
4. Versatilidad de elección entre ambos sistemas de control (PID y Lógica Difusa).
5. Desarrollo de sistema de control escalable una vez terminado el proyecto de control para su fase y etapa final.
6. Legado en el prototipo para sustituir electroimanes por baleros magnéticos activos (BMA), si y solo si, se ajustan los parámetros que sean necesarios para el cambio de electroimanes a BMA.
7. Legado en el sistema de control para la levitación de un rotor en un eje vertical (trabajo con base para trabajos con futuro).
8. Modificación del sistema de aerogeneración a otro sistema de energía renovable (Micro-hidráulica).
9. Ahorro financiero, una vez terminado el proyecto por completo, y ser apto para todo público en comparación con otros productos convencionales.
10. Incremento de generación de energía eléctrica (con el productos terminado).

El estudio, diseño, desarrollo, fabricación, implementación, pruebas, estética, y fabricación en serie y venta al público en general de un aerogenerador de baja capacidad con levitación magnética en el generador eléctrico que es el producto y proyecto final es un sueño que está siendo cada día más alcanzable, con cada grano de arena aportado por cada investigación hará realidad esta innovación.

Las energías renovables es una de las claves y llaves del éxito que tiene el ser humano para convivir en armonía, paz y prosperidad con el medio ambiente. Tenemos que

aprovechar los recursos naturales que tiene nuestro planeta sin tener que dañar nuestro ecosistema a las futuras generaciones, y esto es, porque ellas mismas estarán agradecidas por el trabajo arduo de nosotros de cuidar a nuestro planeta. Las estadísticas no mienten y sabemos que cada día que pasa se suman empresas para pertenecer a ese pequeño (pero poco a poco más grande) círculo de empresas verdes.

---

## REFERENCIAS

- Arduino. (2014). *Arduino*. Obtenido de [www.arduino.cc](http://www.arduino.cc)
- Boylestad, R. L. (2009). Electrónica. En L. N. Robert L. Boylestad, *Electrónica: Teoría de circuitos y dispositivos electrónicos. 10ma Edición*. Pearson.
- Campbell, H. (2012). *Perfil Energetico 2010-2020*. Energia BC.
- Chiba, A. (2005). *Magnetic Bearings and Bearingless Drives*. Newnes.
- CNN, E. (2012). *CNN Expansion*. Obtenido de [www.cnnexpansion.com](http://www.cnnexpansion.com)
- EWEA. (2013). *The European Wind Energy Association - EWEA*. Obtenido de [www.ewea.org](http://www.ewea.org)
- Fernández, R. (2013). *Análisis y diseño de sistemas de control digital*. Mc Graw Hill.
- Hartavi, A. E. (2001). The design, simulation and experimental study of active magnetic bearing. *Electric Machines and Drives Conference, IEEE International*, 492-495.
- IEC. (2014). *International Electrotechnical Commision*. Obtenido de [www.iec.ch](http://www.iec.ch)
- KidWind, P. (2012). *KidWind Project*. Obtenido de [www.learnkidwind.org](http://www.learnkidwind.org)
- Lösch, F. (2002). *Identification and automated controller design for active magnetic bearing systems*. Zurich, Suiza.
- Manwell, J. (2002). *Wind Energy Explained: Theory, design and application*. West Sussex, England: John Wiley and Sons, LTD.
- Navales, A. P. (2008). *Energía Eólica*. Zaragoza, España: Prensas Universitarias de Zaragoza.
- NI. (2014). *National Instruments, Labview*. Obtenido de [www.ni.com](http://www.ni.com)
- Ogata, K. (1998). *Ingeniería de control moderna, 3era Edición*. Prentice Hall.
- Origin. (2013). *Origin Lab*. Obtenido de [www.originlab.com](http://www.originlab.com)
- Palmieri, D. (2000). Construcción de un sistema de levitación magnética para laboratorio controlado por pc en tiempo real.
- RAE. (2014). *Real Academia de la Lengua Española*. Obtenido de [www.rae.es](http://www.rae.es)
- Reforma, p. (Mayo de 2012). *Reforma*. Obtenido de [www.reforma.com](http://www.reforma.com)
- Romero-Hernández, D. S. (2011). *Energías Renovables: Impulso político y tecnológico para un México sustentable*. México, D.F.: e:de, business by design.

- Rosales, P. (2014). Estudio de un aerogenerador de baja capacidad en condiciones de arranque. En P. Rosales.
- Ross, T. J. (2010). *Fuzzy Logic- with engineering applications*. Wiley.
- Schweitzer, G. (2009). *Magnetic Bearings: Theory, design, and Application to rotating machinery*. Switzerland: Springer.
- Woofenden, I. (2009). *Wind Power for Dummies*. Indianapolis, Indiana: Wiley Publishing.
- Wu, H. (2009). Development of small wind generator based on hybrid magnetic bearing. *Power and Energy Engineering Conference, APPEEC 2009. Asia-Pacific*, 1-4.
- Wu, H. (2010). Study on magnetic levitation wind turbine for vertical type and low wind speed. *Sch. of Mech. Eng., Wuhan Univ. of Technol., Wuhan, China*.
- WWEA. (2014). *World Wind Energy Association*. Obtenido de [www.wwindea.org](http://www.wwindea.org)

## *Anexo A*

```

/*****
LVFA_Firmware - Provides Basic Arduino Sketch For Interfacing With LabVIEW.
** Written By: Sam Kristoff - National Instruments
** Written On: November 2010
** Last Updated: Dec 2011 - Kevin Fort - National Instruments
*****/

// Standard includes. These should always be included.
#include <Wire.h>
#include <SPI.h>
#include <Servo.h>
#include "LabVIEWInterface.h"

/*****
** setup()
**
** Initialize the Arduino and setup serial communication.
**
** Input: None
** Output: None
*****/

void setup()
{
// Initialize Serial Port With The Default Baud Rate
syncLV();

// Place your custom setup code here
}

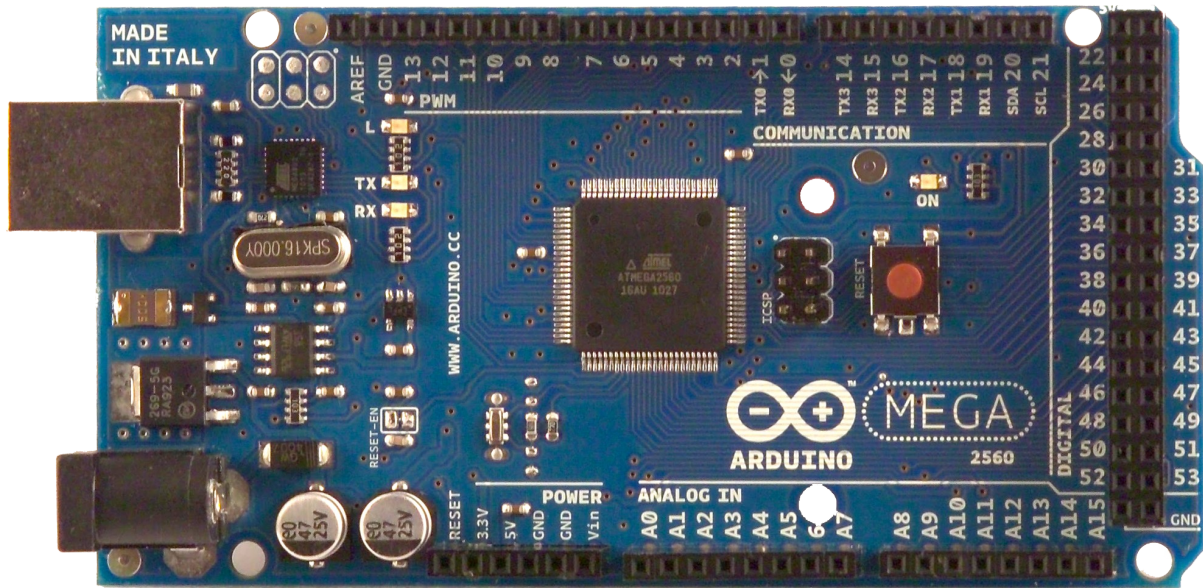
/*****
** loop()
**
** The main loop. This loop runs continuously on the Arduino. It
** receives and processes serial commands from LabVIEW.
**
** Input: None
** Output: None
*****/

void loop()
{
// Check for commands from LabVIEW and process them.
checkForCommand();
// Place your custom loop code here (this may slow down communication with
LabVIEW)
if(acqMode==1)
{
sampleContinously();
}
}

```

## *Anexo B*

# Arduino MEGA 2560



## Product Overview

The Arduino Mega 2560 is a microcontroller board based on the ATmega2560 ([datasheet](#)). It has 54 digital input/output pins (of which 14 can be used as PWM outputs), 16 analog inputs, 4 UARTs (hardware serial ports), a 16 MHz crystal oscillator, a USB connection, a power jack, an ICSP header, and a reset button. It contains everything needed to support the microcontroller; simply connect it to a computer with a USB cable or power it with a AC-to-DC adapter or battery to get started. The Mega is compatible with most shields designed for the Arduino Duemilanove or Diecimila.

## Index

Technical Specifications

Page 2

How to use Arduino  
Programming Enviroment, Basic Tutorials

Page 6

Terms & Conditions

Page 7

Enviromental Policies  
half sqm of green via Impatto Zero®

Page 7



**RADIOSPARES**

**RADIONICS**



# Technical Specification

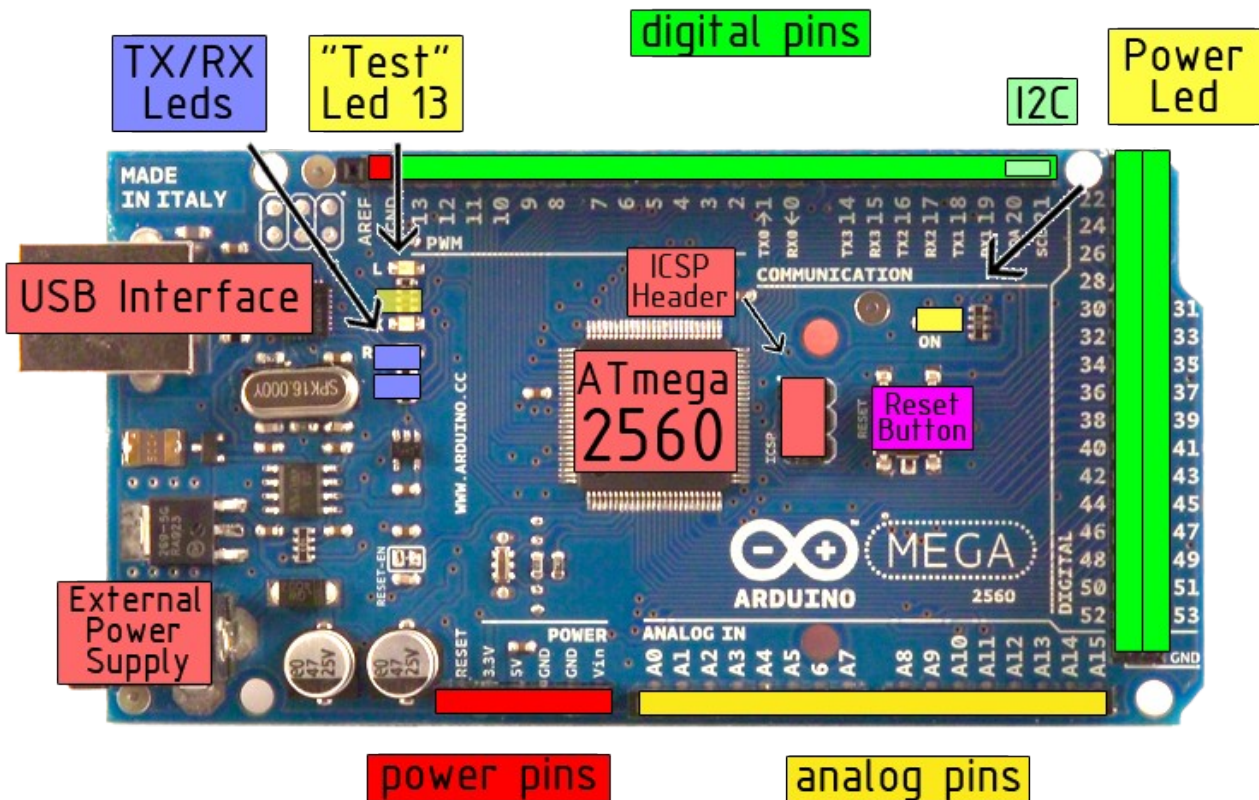


EAGLE files: [arduino-mega2560-reference-design.zip](#) Schematic: [arduino-mega2560-schematic.pdf](#)

## Summary

Microcontroller	ATmega2560
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limits)	6-20V
Digital I/O Pins	54 (of which 14 provide PWM output)
Analog Input Pins	16
DC Current per I/O Pin	40 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	256 KB of which 8 KB used by bootloader
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Clock Speed	16 MHz

## the board

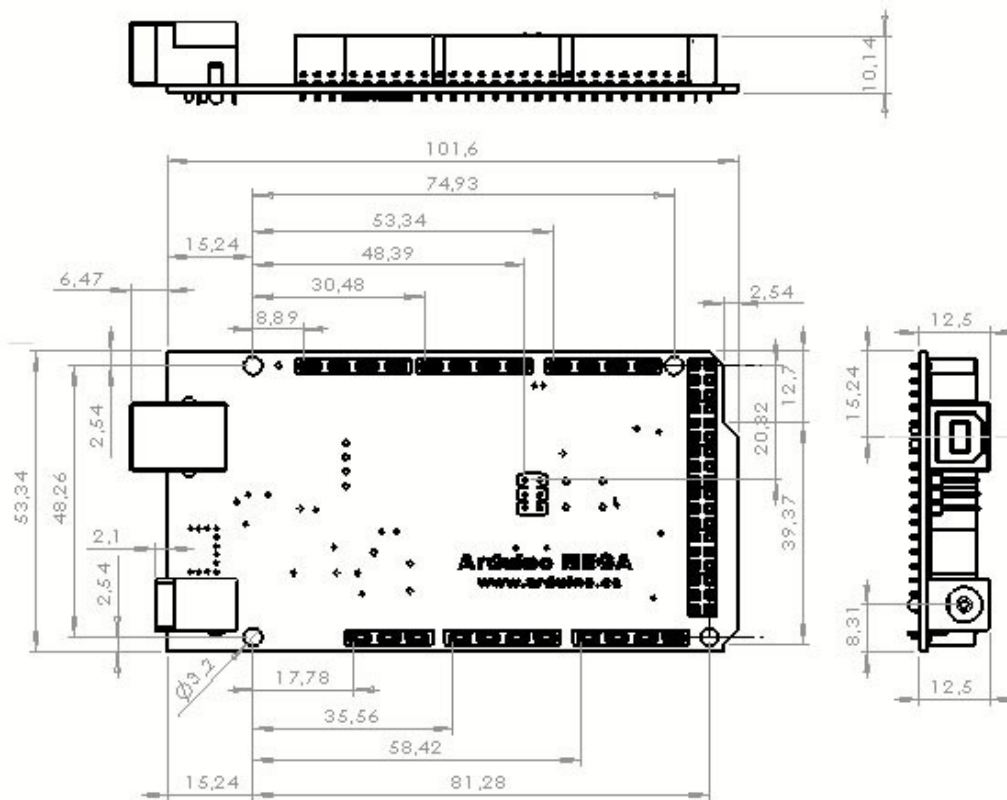
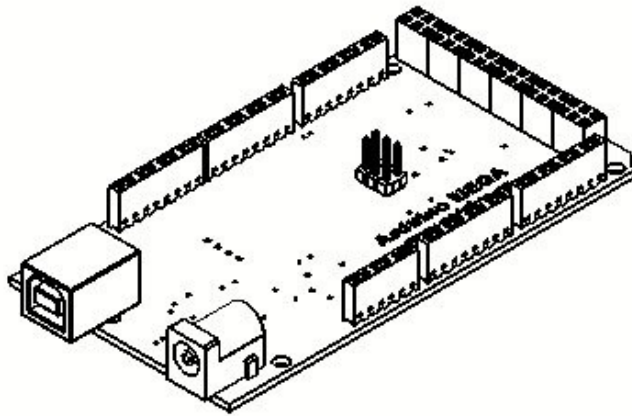


*radiospares*

**RADIONICS**



# Dimensioned Drawing



**radiospares**

**RADIONICS**

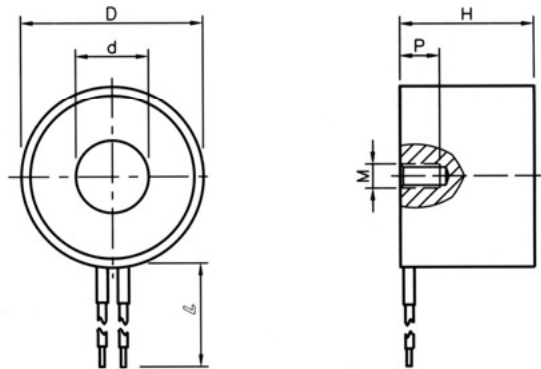


12VDC Brand new in box 65mm OD 30mm high holding electromagnet lift 80kg

Power:13W

weight:600g

Type:HCNE1-P65/30

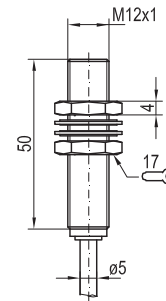


Type	D	d	H	M	P	L	Power	Force	Weight
	mm	mm	mm	-	mm	mm	W	N	g
HCNE <sub>1</sub> -P13	Φ13	Φ5	30	M3	6	200	2.5	12	20
HCNE <sub>1</sub> -P20	Φ20	Φ8	15	M3	6	200	3	25	15
HCNE <sub>1</sub> -P25	Φ25	Φ10	20	M4	6	200	4	50	50
HCNE <sub>1</sub> -P30	Φ30	Φ12	22	M4	6	250	5	100	80
HCNE <sub>1</sub> -P32	Φ32	Φ13	22	M4	6	250	5	140	90
HCNE <sub>1</sub> -P34	Φ34	Φ16	18	M4	6	250	6	180	90
HCNE <sub>1</sub> -P40	Φ40	Φ18	20	M5	8	250	8	250	130
HCNE <sub>1</sub> -P49	Φ49	Φ22	21	M6	8	300	10	400	230
HCNE <sub>1</sub> -P50	Φ50	Φ20	27	M5	8	300	10	500	300
HCNE <sub>1</sub> -P59	Φ59	Φ27	34	M8	10	300	12	700	560
HCNE <sub>1</sub> -P65	Φ65	Φ26	30	M8	12	300	13	800	600
HCNE <sub>1</sub> -P80	Φ80	Φ34	38	M8	12	300	14	1000	1100
HCNE <sub>1</sub> -P100	Φ100	Φ42	40	M8	15	300	15	1200	1900

Inductive sensor with analogue output



### Cable connection



153-00337

Sensor data		Electrical data		Mechanical data	
Switching distance	0 ... 6 mm	Operating voltage, +U <sub>B</sub>	15 ... 30 V DC <sup>1</sup>	Dimensions	M12 x 50 mm
Repeatability	≤ 0.3 mm	No-load current, I <sub>0</sub>	≤ 10 mA	Enclosure rating	IP 67 <sup>2</sup>
		Min. load resistance	0 Ω	Mounting	Quasi-flush
		Max. load resistance	200 Ω	Material, housing	Brass, chrome-plated
		Protective circuits	Short-circuit protection (Q) / overload protection	Type of connection	See Selection Table
		Analogue output	0 ... 10 V / 4 ... 20 mA	Ambient temperature: operation	-10 ... +60 °C

<sup>1</sup> Max. 10 % ripple, within U<sub>B</sub>    <sup>2</sup> With connected IP 67 plug

Connection, 4-wire	Characteristic output curve
<p>154-00215</p>	<p>091-13282</p>

12

Switching distance	Analogue output	Type of connection	Part number	Article number
6 mm	0 ... 10 V / 4 ... 20 mA	Cable, 4-wire	IS 512-02 AI	996-51479

# ACERO AISI-SAE 4140 (UNS G41400)

**1. Descripción:** es un acero medio carbono aleado con cromo y molibdeno de alta templabilidad y buena resistencia a la fatiga, abrasión e impacto. Este acero puede ser nitrurado para darle mayor resistencia a la abrasión. Es susceptible al endurecimiento por tratamiento térmico

**2. Normas involucradas:** ASTM 322

**3. Propiedades mecánicas:** Dureza 275 - 320 HB (29 – 34 HRc)  
Esfuerzo a la fluencia: 690 MPa (100 KSI)  
Esfuerzo máximo: 900 - 1050 MPa (130 - 152 KSI)  
Elongación mínima 12%  
Reducción de área mínima 50%

**4. Propiedades físicas:** Densidad 7.85 g/cm<sup>3</sup> (0.284 lb/in<sup>3</sup>)

**5. Propiedades químicas:** 0.38 - 0.43% C  
0.75 – 1.00 % Mn  
0.80 – 1.10 % Cr  
0.15 – 0.25 % Mo  
0.15 – 0.35 % Si  
0.04 % P máx  
0.05 % S máx

**6. Usos:** se usa para piñones pequeños, tijeras, tornillo de alta resistencia, espárragos, guías, seguidores de leva, ejes reductores, cinceles.

**7. Tratamientos térmicos:** se austeniza a temperatura entre 830 - 850 °C y se da temple en aceite. El revenido se da por dos horas a 200°C para obtener dureza de 57 HRc y si se da a 315°C la dureza será de 50 HRc. Para recocido se calienta entre 680 – 720°C con dos horas de mantenimiento, luego se enfría a 15°C por hora hasta 600°C y se termina enfriando al aire tranquilo. Para el alivio de tensiones se calienta entre 450 – 650°C y se mantiene entre ½ y 2 horas. Se enfría en el horno hasta 450°C y luego se deja enfriar al aire tranquilo.

**NOTA:**

Los valores expresados en las propiedades mecánicas y físicas corresponden a los valores promedio que se espera cumple el material. Tales valores son para orientar a aquella persona que debe diseñar o construir algún componente o estructura pero en ningún momento se deben considerar como valores estrictamente exactos para su uso en el diseño.

## ACERO MAQUINARIA - AISI 4140

## DESCRIPTION

The 4N29, 4N30, 4N31, 4N32, 4N33 have a gallium arsenide infrared emitter optically coupled to a silicon planar photodarlington.

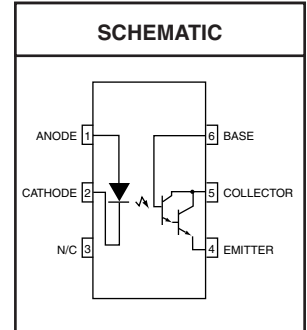
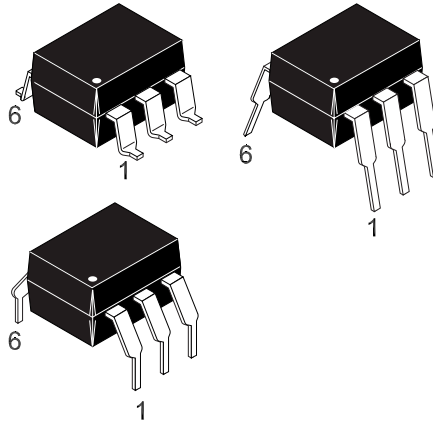
**4N29    4N30    4N31    4N32    4N33**

## FEATURES

- High sensitivity to low input drive current
- Meets or exceeds all JEDEC Registered Specifications
- VDE 0884 approval available as a test option  
-add option .300. (e.g., 4N29.300)

## APPLICATIONS

- Low power logic circuits
- Telecommunications equipment
- Portable electronics
- Solid state relays
- Interfacing coupling systems of different potentials and impedances.



<b>ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS</b> ( $T_A = 25^\circ\text{C}$ Unless otherwise specified.)			
Parameter	Symbol	Value	Units
<b>TOTAL DEVICE</b>			
Storage Temperature	$T_{\text{STG}}$	-55 to +150	$^\circ\text{C}$
Operating Temperature	$T_{\text{OPR}}$	-55 to +100	$^\circ\text{C}$
Lead Solder Temperature	$T_{\text{SOL}}$	260 for 10 sec	$^\circ\text{C}$
Total Device Power Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$	$P_D$	250	mW
Derate above $25^\circ\text{C}$		3.3	mW/ $^\circ\text{C}$
<b>EMITTER</b>			
Continuous Forward Current	$I_F$	80	mA
Reverse Voltage	$V_R$	3	V
Forward Current - Peak (300 $\mu\text{s}$ , 2% Duty Cycle)	$I_F(\text{pk})$	3.0	A
LED Power Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$	$P_D$	150	mW
Derate above $25^\circ\text{C}$		2.0	mW/ $^\circ\text{C}$
<b>DETECTOR</b>			
Collector-Emitter Breakdown Voltage	$BV_{\text{CEO}}$	30	V
Collector-Base Breakdown Voltage	$BV_{\text{CBO}}$	30	V
Emitter-Collector Breakdown Voltage	$BV_{\text{ECO}}$	5	V
Detector Power Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$	$P_D$	150	mW
Derate above $25^\circ\text{C}$		2.0	mW/ $^\circ\text{C}$
Continuous Collector Current	$I_C$	150	mA

# 2N5302

## High-Power NPN Silicon Transistor

High-power NPN silicon transistors are for use in power amplifier and switching circuits applications.

### Features

- Low Collector–Emitter Saturation Voltage –  
 $V_{CE(sat)} = 0.75 \text{ Vdc (Max) @ } I_C = 10 \text{ Adc}$
- Pb–Free Package is Available\*

### MAXIMUM RATINGS (Note 1) ( $T_J = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Rating	Symbol	Value	Unit
Collector–Emitter Voltage	$V_{CEO}$	60	Vdc
Collector–Base Voltage	$V_{CB}$	60	Vdc
Collector Current – Continuous (Note 2)	$I_C$	30	Adc
Base Current	$I_B$	7.5	Adc
Total Device Dissipation @ $T_C = 25^\circ\text{C}$ Derate above $25^\circ\text{C}$	$P_D$	200 1.14	W W/ $^\circ\text{C}$
Operating and Storage Junction Temperature Range	$T_J, T_{stg}$	–65 to +200	$^\circ\text{C}$

### THERMAL CHARACTERISTICS

Characteristic	Symbol	Max	Unit
Thermal Resistance, Junction–to–Case	$\theta_{JC}$	0.875	$^\circ\text{C/W}$
Thermal Resistance, Case–to–Ambient	$\theta_{CA}$	34	$^\circ\text{C/W}$

Stresses exceeding Maximum Ratings may damage the device. Maximum Ratings are stress ratings only. Functional operation above the Recommended Operating Conditions is not implied. Extended exposure to stresses above the Recommended Operating Conditions may affect device reliability.

1. Indicates JEDEC Registered Data.
2. Pulse Test: Pulse Width = 5  $\mu\text{s}$ , Duty Cycle  $\leq 10\%$ .

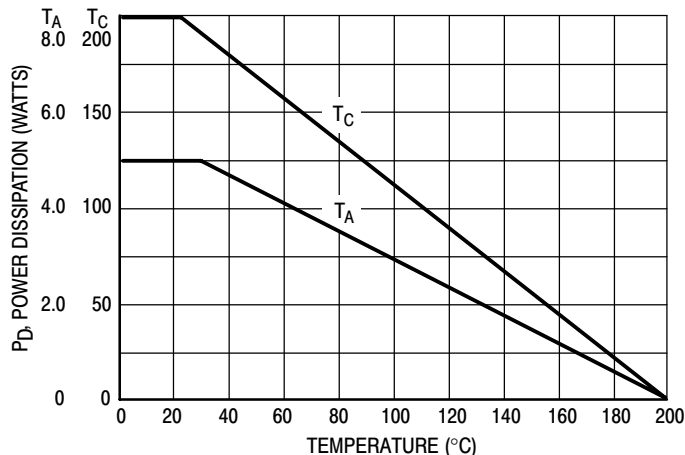


Figure 1. Power Temperature Derating Curve

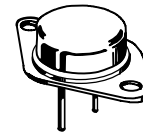
\*For additional information on our Pb–Free strategy and soldering details, please download the ON Semiconductor Soldering and Mounting Techniques Reference Manual, SOLDERRM/D.



**ON Semiconductor®**

<http://onsemi.com>

**30 AMPERES  
POWER TRANSISTOR  
NPN SILICON  
60 VOLTS, 200 WATTS**



TO–204AA (TO–3)  
CASE 1–07  
STYLE 1

### MARKING DIAGRAM



2N5302 = Device Code  
 G = Pb–Free Package  
 A = Location Code  
 YY = Year  
 WW = Work Week  
 MEX = Country of Origin

### ORDERING INFORMATION

Device	Package	Shipping
2N5302	TO–204	100 Units/Tray
2N5302G	TO–204 (Pb–Free)	100 Units/Tray

# 8GHz RF EMF Strength Meter

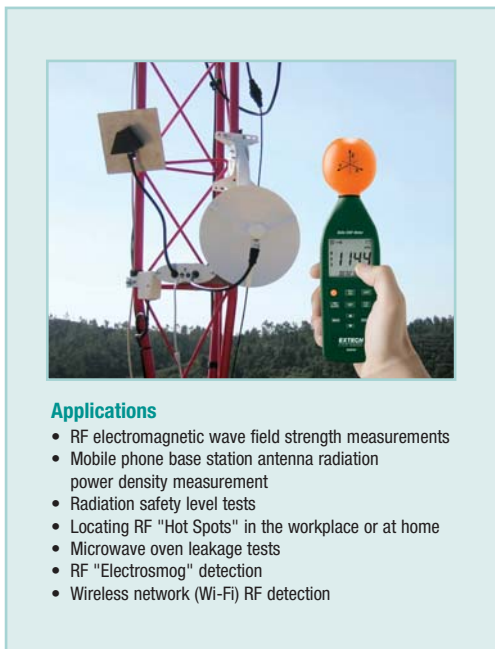


## High Frequency measurement for EMF

Monitor high frequency radiation in the 10MHz to 8GHz frequency range

### Features:

- For electromagnetic field strength measurement including mobile phone base station antenna radiation, RF power measurement for transmitters, wireless LAN (Wi-Fi) detection/installation, wireless communication applications (CW, TDMA, GSM, DECT) and microwave leakage
- Measurement optimized for 900MHz, 1800MHz, 2.7GHz, 3.5GHz and 8GHz
- Non-directional (isotropic) measurement with three-channel (triaxial) measurement probe
- Max Hold and Average functions
- Manual store/recall up to 99 sets
- Level exceed audible alarm with user selectable threshold
- Complete with 9V battery and carrying case



### Applications

- RF electromagnetic wave field strength measurements
- Mobile phone base station antenna radiation power density measurement
- Radiation safety level tests
- Locating RF "Hot Spots" in the workplace or at home
- Microwave oven leakage tests
- RF "Electromog" detection
- Wireless network (Wi-Fi) RF detection

Specifications	
Sensor Type	Electric Field
Frequency Range	10MHz to 8GHz (optimized for 900MHz, 1800MHz, 2.7GHz, 3.5GHz & 8GHz)
Units of Measure	mV/m, V/m, $\mu$ A/m, mA/m, $\mu$ W/m <sup>2</sup> , mW/m <sup>2</sup> , W/m <sup>2</sup> , $\mu$ W/cm <sup>2</sup> , mW/cm <sup>2</sup>
Measuring Ranges	20mV/m to 108.0V/m 53 $\mu$ A/m to 286.4mA/m 1 $\mu$ W/m <sup>2</sup> to 30.93W/m <sup>2</sup> 0 $\mu$ W/cm <sup>2</sup> to 3.093mW/cm <sup>2</sup>
Resolution	0.1mV/m, 0.1 $\mu$ A/m, 0.1 $\mu$ W/m <sup>2</sup> , 0.001 $\mu$ W/cm <sup>2</sup>
Audible Alarm	Adjustable threshold with On/Off
Memory	Manual store/recall of 99 sets
Dimensions	2.6x2.4x9.7" (67x60x247xmm)
Weight	8.8oz (250g)

### Ordering Information:

480846 .....RF Electromagnetic Field Strength Meter



## *Anexo C*

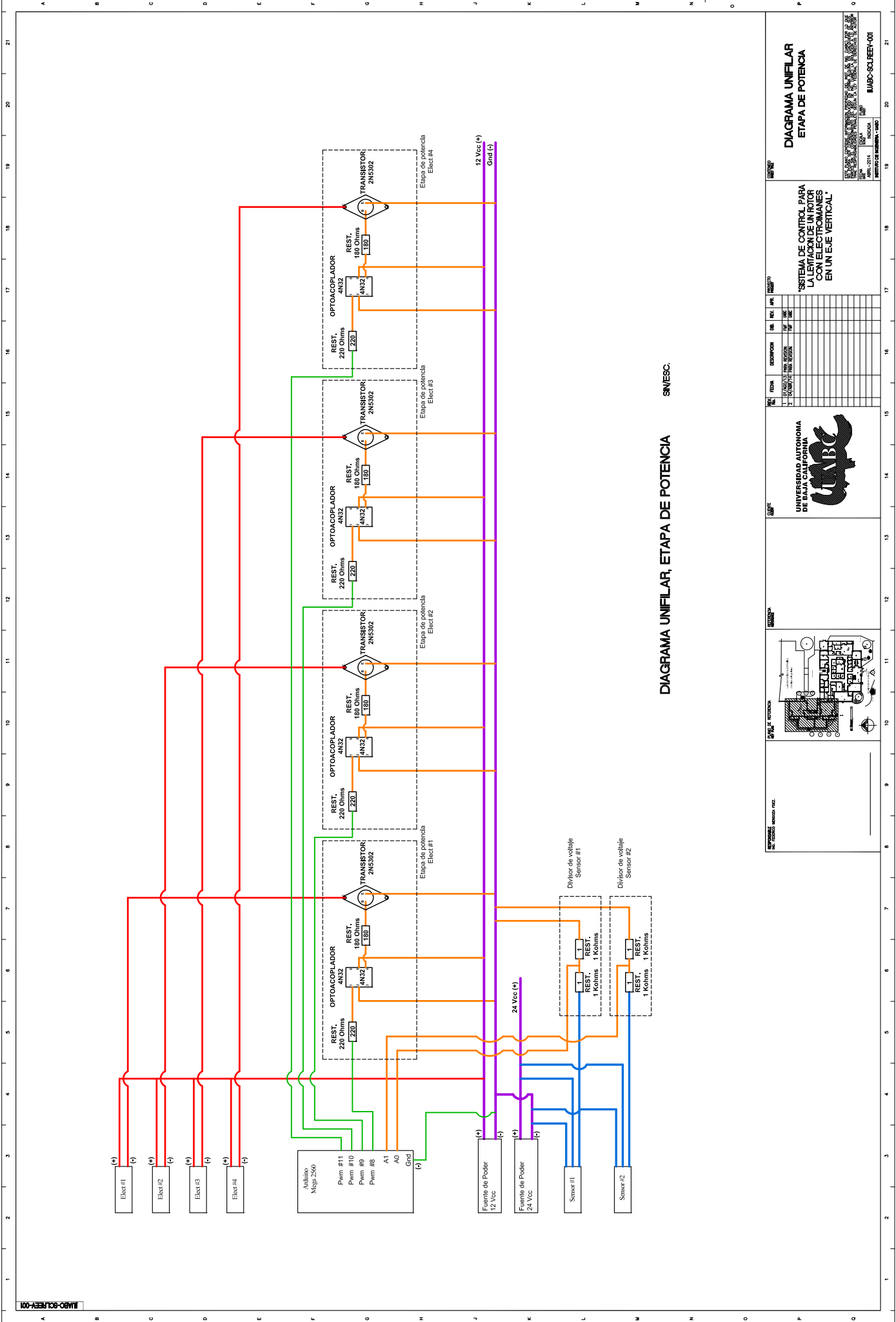
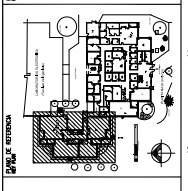


DIAGRAMA UNIFILAR, ETAPA DE POTENCIA. SNVESC.

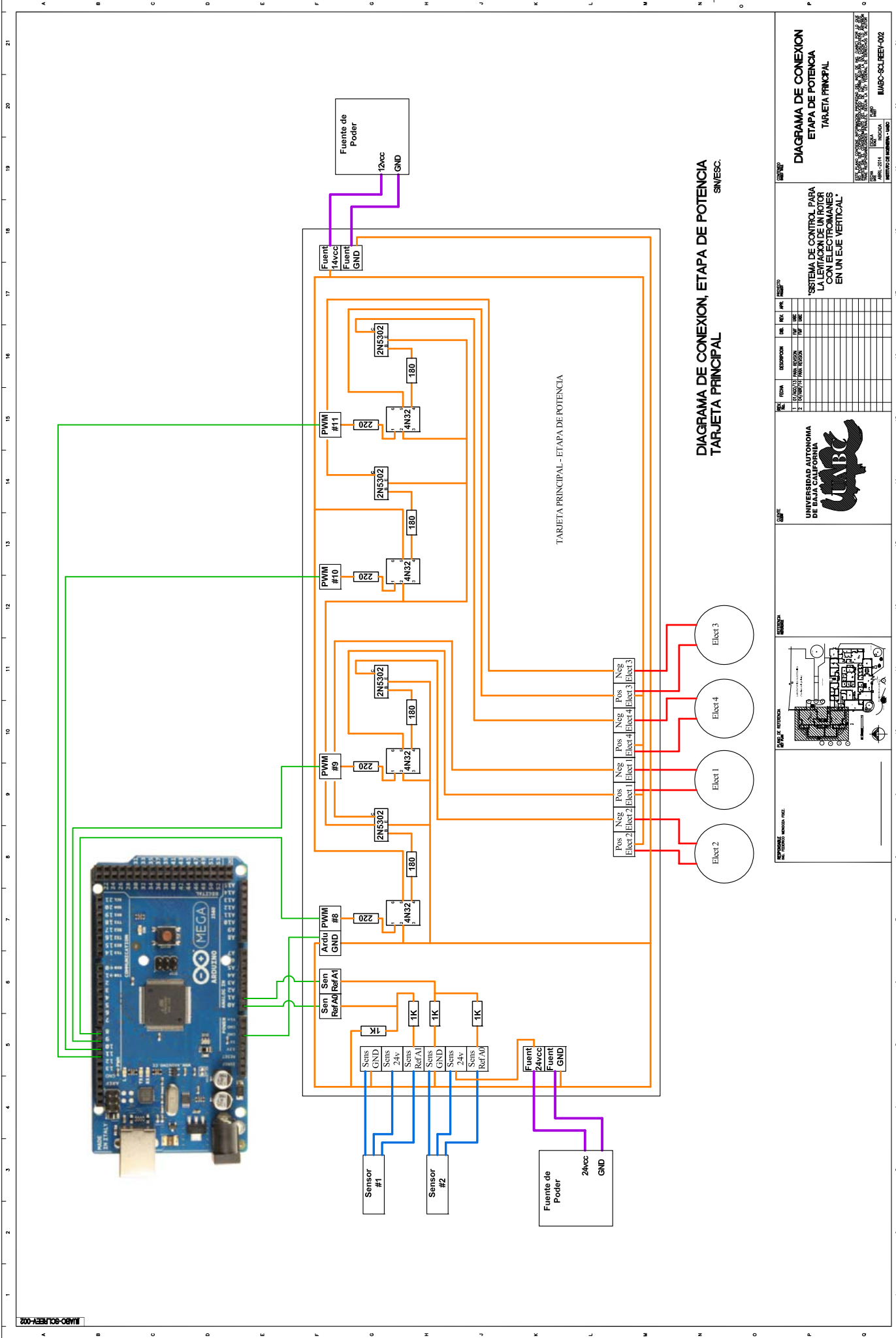
DIAGRAMA UNIFILAR  
ETAPA DE POTENCIA

“SISTEMA DE CONTROL PARA LA ERIGIDA PARA LOS ELECTROMANES EN UN EJE VERTICAL”

FECHA	FECHA	FECHA	FECHA	FECHA	FECHA	FECHA	FECHA	FECHA	FECHA
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA  
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD  
Módulo de Electrónica I  
MBC-SCURBEY-001



**DIAGRAMA DE CONEXION, ETAPA DE POTENCIA**  
SN/ESC.

**DIAGRAMA DE CONEXION  
ETAPA DE POTENCIA  
TARJETA PRINCIPAL**

REV.	FECH.	AUT.	DISEÑ.	CORRECC.	COMPROB.	MONTAJE.	PRUEBAS.	ENTREGA.

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA  
**UNBC**  
 INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ELECTRONICA Y SISTEMAS DE CONTROL

\*SISTEMA DE CONTROL PARA LA REGULACION DE LA VELOCIDAD DE UN MOTOR EN UN EJE VERTICAL\*

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA  
**UNBC**

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ELECTRONICA Y SISTEMAS DE CONTROL

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA  
 INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ELECTRONICA Y SISTEMAS DE CONTROL  
 CARRANZA, B.C.

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA  
**UNBC**

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ELECTRONICA Y SISTEMAS DE CONTROL

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA  
 INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ELECTRONICA Y SISTEMAS DE CONTROL  
 CARRANZA, B.C.

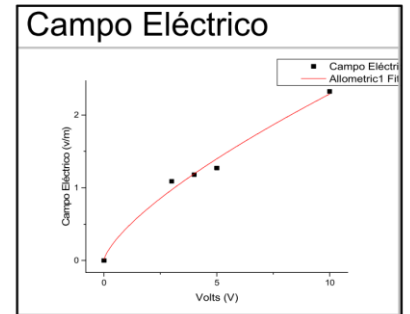
## *Anexo D*

## Nonlinear Curve Fit (Allometric1)

### Notes

Description	Nonlinear Curve Fit	
User Name	Endozzz	
Operation Time		
Iteration Algorithm	Orthogonal Distance Regression	
Model	Allometric1	
Number of Parameters		2
Number of Derived Parameters		0
Number of Datasets		1
Equation	$y = a \cdot x^b$	
Report Status	Report generated from Data Changed	
Special Input Handling		
Data Filter	No	

### Fitted Curves Plot



### Input Data

	Dep/Indep	Data	Range	Weight Type
Campo Eléctrico	x Indep	[Book1]Sheet1!A"Volts"	[1:13]	No Weighting
	y Dep	[Book1]Sheet1!B"Campo Eléctrico"	[1:13]	No Weighting

### Parameters

		Value	Standard Error
Campo Eléctrico	a	0.4446	0.06293
	b	0.71184	0.07209

Reduced Chi-sqr = 0.00999409479477

COD(R<sup>2</sup>) = 0.99963413398031

Iterations Performed = 4

Total Iterations in Session = 4

Fit converged. Chi-Sqr tolerance value of 1E-9 was reached.

### Statistics

	Campo Eléctrico
Number of Points	5
Degrees of Freedom	3
Reduced Chi-Sqr	0.00999
Residual Sum of Squares	0.02998
Adj. R-Square	0.99951
Fit Status	Succeeded(100)

Fit Status Code :

100 : Fit converged. Chi-Sqr tolerance value of 1E-9 was reached.

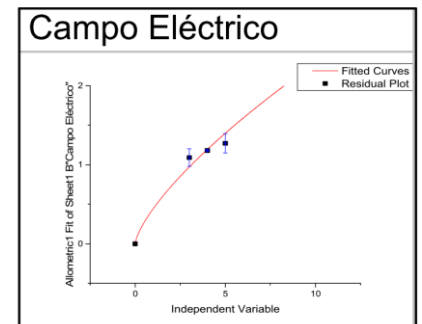
### Summary

	a		b		Statistics	
	Value	Standard Error	Value	Standard Error	Reduced Chi-Sqr	Adj. R-Square
Campo Eléctrico	0.4446	0.06293	0.71184	0.07209	0.00999	0.99951

### ANOVA

		DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Campo Eléctrico	Regression	2	9.56465	4.78232	478.51501	2.09108E-4
	Residual	3	0.02998	0.00999		
	Uncorrected Total	5	9.59463			
	Corrected Total	4	2.71499			

### Residual Plot

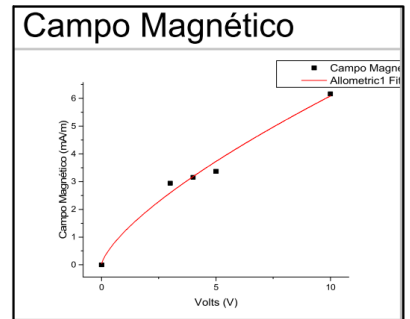


# Nonlinear Curve Fit (Allometric1)

## Notes

Description	Nonlinear Curve Fit	
User Name	Endozzz	
Operation Time		
Iteration Algorithm	Orthogonal Distance Regression	
Model	Allometric1	
Number of Parameters		2
Number of Derived Parameters		0
Number of Datasets		1
Equation	$y = a \cdot x^b$	
Report Status	Report generated from Data Changed	
Special Input Handling		
Data Filter	No	

## Fitted Curves Plot



## Input Data

	Dep/Indep	Data	Range	Weight Type
Campo Magnético	x Indep	[Book1]Sheet1!A"Volts"	[1:13]	No Weighting
	y Dep	[Book1]Sheet1!B"Campo Magnético"	[1:13]	No Weighting

## Parameters

	Value	Standard Error
Campo Magnético	a	1.19117
	b	0.70847

Reduced Chi-sqr = 0.0635348741601

COD(R<sup>2</sup>) = 0.99750349080432

Iterations Performed = 5

Total Iterations in Session = 5

Fit converged. Chi-Sqr tolerance value of 1E-9 was reached.

## Statistics

	Campo Magnético
Number of Points	5
Degrees of Freedom	3
Reduced Chi-Sqr	0.06353
Residual Sum of Squares	0.1906
Adj. R-Square	0.99667
Fit Status	Succeeded(100)

Fit Status Code :

100 : Fit converged. Chi-Sqr tolerance value of 1E-9 was reached.

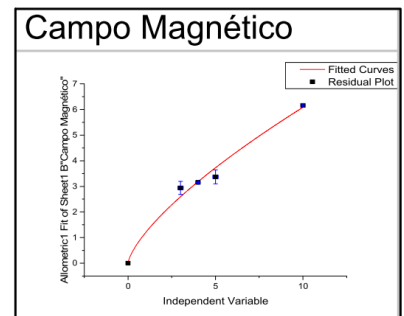
## Summary

	a		b		Statistics	
	Value	Standard Error	Value	Standard Error	Reduced Chi-Sqr	Adj. R-Square
Campo Magnético	1.19117	0.17751	0.70847	0.07529	0.06353	0.99667

## ANOVA

		DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Campo Magnético	Regression	2	67.75954	33.87977	533.24684	1.77891E-4
	Residual	3	0.1906	0.06353		
	Uncorrected Total	5	67.95015			
	Corrected Total	4	19.09077			

## Residual Plot

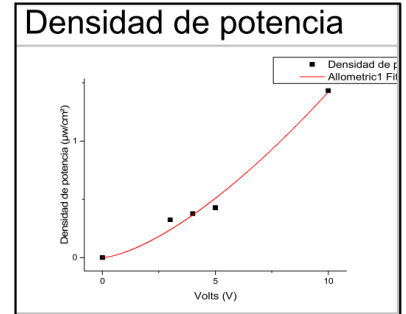


## Nonlinear Curve Fit (Allometric1)

### Notes

Description	Nonlinear Curve Fit	
User Name	Endozzz	
Operation Time		
Iteration Algorithm	Orthogonal Distance Regression	
Model	Allometric1	
Number of Parameters		2
Number of Derived Parameters		0
Number of Datasets		1
Equation	$y = a \cdot x^b$	
Report Status	Report generated from Data Change	
Special Input Handling		
Data Filter	No	

### Fitted Curves Plot



### Input Data

	Dep/Indep	Data	Range	Weight Type	
Densidad de Potencia	x	Indep	[Book1]Sheet1!A"Volts"	[1:13]	No Weighting
	y	Dep	[Book1]Sheet1!B"Densidad de Potencia"	[1:13]	No Weighting

### Parameters

		Value	Standard Error
Densidad de Potencia	a	0.04706	0.01373
	b	1.47969	0.13419

Reduced Chi-sqr = 0.00465831598185

COD(R<sup>2</sup>) = 0.99984834956721

Iterations Performed = 5

Total Iterations in Session = 5

Fit converged. Chi-Sqr tolerance value of 1E-9 was reached.

### Statistics

	Densidad de Potencia
Number of Points	5
Degrees of Freedom	3
Reduced Chi-Sqr	0.00466
Residual Sum of Squares	0.01397
Adj. R-Square	0.9998
Fit Status	Succeeded(100)

Fit Status Code :

100 : Fit converged. Chi-Sqr tolerance value of 1E-9 was reached.

### Summary

	a		b		Statistics	
	Value	Standard Error	Value	Standard Error	Reduced Chi-Sqr	Adj. R-Square
Densidad de Potencia	0.04706	0.01373	1.47969	0.13419	0.00466	0.9998

### ANOVA

		DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Densidad de Potencia	Regression	2	2.46759	1.23379	264.85827	5.04753E-4
	Residual	3	0.01397	0.00466		
	Uncorrected Total	5	2.48156			
	Corrected Total	4	1.16879			

### Residual Plot

