

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y  
ELECTRÓNICA**

**OPERACIÓN DEL SISTEMA DE POTENCIA A ESCALA DEL  
LABORATORIO FÍSICO DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE  
POTENCIA**

**OPERACIÓN EN PARALELO DEL EMULADOR DE ENERGÍA  
EÓLICA CON LA RED ELÉCTRICA DE LA EEQ**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO  
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN  
ELECTRICIDAD**

**LENIN DAVID PLAZAS YÉPEZ**

**DIRECTOR: Prof. JESÚS AMADO JÁTIVA IBARRA, Ph.D.**

**DMQ, marzo 2022**

## **CERTIFICACIONES**

Yo, PLAZAS YÉPEZ LENIN DAVID declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

---

**LENIN DAVID PLAZAS YÉPEZ**

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por PLAZAS YÉPEZ LENIN DAVID, bajo mi supervisión.

---

**Prof. JESÚS AMADO JÁTIVA IBARRA, Ph.D.**  
**DIRECTOR**

Certificamos que revisamos el presente trabajo de integración curricular.

---

**NOMBRE\_REVISOR1**  
**REVISOR1 DEL TRABAJO DE**  
**INTEGRACIÓN CURRICULAR**

---

**NOMBRE\_REVISOR2**  
**REVISOR2 DEL TRABAJO DE**  
**INTEGRACIÓN CURRICULAR**

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA**

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

**LENIN DAVID PLAZAS YÉPEZ**

**Prof. JESÚS AMADO JÁTIVA IBARRA, Ph.D.**

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo de integración curricular lo dedico a Dios por darme la fuerza para seguir en este arduo camino universitario, así como sus bendiciones en lo que va de mi vida.

A mi padre Adolfo Plazas, a mi madre Silvia Yépez, a mis hermanos Andy y Jazmín Plazas que han sido un pilar fundamental en este arduo camino, un ejemplo de esfuerzo y dedicación, además que me han brindado todo su cariño, consejos y apoyo incondicional.

Y por último a la memoria de mis abuelitos: Segundo Adolfo Plazas, Lucila Altamirano, Alfredo Yépez que estarían orgullosos de este gran logro.

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios por nunca abandonarme en este camino y por siempre llenarme de bendiciones en cada paso de mi vida.

A mis padres Adolfo y Silvia, por su apoyo, amor y consejos brindados a lo largo de mi vida. Y por nunca dejar que me dé por vencido.

A mis hermanos Andy, Jazmín y Daysi que siempre me han motivado para seguir adelante y no dejarme vencer.

A mi primo Robert Acosta por siempre estar a mi lado apoyándome, aconsejándome durante toda mi carrera universitaria.

A mi director, Dr. Jesús Játiva, por la confianza, conocimientos y paciencia durante este periodo de mi trabajo de integración curricular.

A Carla, por estar a mi lado apoyándome durante la realización de este trabajo.

Finalmente agradezco a mis amigos, por las experiencias vividas, trabajos realizados y apoyo en los momentos complicados pasados en la universidad.

Gracias a todos por su apoyo.

## TABLA DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
RESUMEN .....	VII
ABSTRACT .....	VIII
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Objetivo general .....	1
1.2 Objetivos específicos .....	2
1.3 Alcance .....	2
1.4 Marco teórico .....	3
1.4.1 Resumen de los Principios de Funcionamiento de las Cuatro Fuentes de Generación Disponibles en el Laboratorio Físico de Sistemas Eléctricos de Potencia 3	
1.4.1.1 Instalaciones desde el transformador .....	3
1.4.1.2 Emulador Eólico.....	6
1.4.1.3 Grupo Motor-Generador.....	8
<b>1.4.1.3.1 Motor DC</b> .....	9
1.4.1.4 Generador Fotovoltaico .....	10
2 METODOLOGÍA.....	12
2.1 Descripción del seguimiento del punto de máxima potencia MPPT .....	13
2.2 Descripción del lazo de enclavamiento de fase PLL .....	17
2.3 Modulación vectorial espacial .....	20
2.3.1 Formación de los vectores espaciales .....	21
2.4 Descripción del Emulador de Energía Eólica .....	26
2.4.1 Dinamómetro de Cuatro Cuadrantes/Fuente de Alimentación.....	27
2.4.2 Máquina de Inducción de Rotor Bobinado .....	28
2.4.3 Máquina Síncrona de Imanes Permanentes .....	28
2.4.4 Módulo IGBT Chopper/Inverter .....	29
2.4.5 Fuente de Alimentación.....	30
2.4.6 Carga Resistiva.....	30
2.4.7 Módulo del Transformador .....	31
2.4.8 Interfaz de Adquisición y Control de Datos .....	31
2.4.9 Inductores de Línea.....	32

2.4.10	Software o Programa LVDA-EMS.....	32
3	PRUEBAS, RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES....	37
3.1	Pruebas y Resultados .....	37
3.1.1	Pruebas en la PMSG .....	37
3.1.2	Pruebas del Aerogenerador con PMSG .....	45
3.2	Conclusiones.....	51
3.3	Recomendaciones.....	52
4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	54
5	ANEXOS.....	55

## RESUMEN

El presente trabajo se trata del análisis de la operación del emulador de energía eólica adquirido por el Departamento de Energía Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional. Conociendo la importancia que hoy en día son las fuentes de generación renovable es beneficioso que se puede trabajar y entender mucho más como puede ayudar a mejorar el sistema eléctrico ecuatoriano y el medio ambiente. El emulador de energía eólica del Laboratorio Físico de Sistemas Eléctricos de Potencia cuenta con los módulos suficientes para permitir la simulación de un generador eólico: desde la simulación del viento que chocan con las aspas de las turbinas, una caja multiplicadora de la velocidad, las conversiones AC/DC y DC/AC así como un transformador de acoplamiento, además del software requerido para el funcionamiento y la puesta en paralelo a la red.

El emulador de energía eólica cuenta con un dinamómetro/fuente de alimentación de cuatro cuadrantes que permite la simulación de la turbina eólica, la misma que conectada a una máquina de imanes permanentes forman un generador sincrónico de imanes permanentes (por sus siglas inglés PMSG), el cual permite llegar a velocidades de alrededor de 6000 r.p.m. El PMSG conecta un sistema de conversión AC/DC-DC/AC que permite la conversión del voltaje del PMSG al voltaje de la red, utilizando dos técnicas de control: la primera conocida como seguimiento del punto de máxima potencia (por sus siglas en inglés MPPT), que controla el lado del generador utilizando señales de corriente del estator de la máquina de imanes permanentes. Dicha técnica tiene la función de encontrar la velocidad y torque óptimo a los cuales el generador pueda ingresar a la red eléctrica, sin provocar riesgos, o encontrar la velocidad del generador cuando ha encontrado el punto de máxima potencia; mientras que, la otra técnica es la del control del lazo de enclavamiento de fase (por sus siglas en inglés PLL) que monitorea el lado de la red y su función es analizar el voltaje, ángulo de fase y frecuencia con la que la red se encuentra, para así poder acoplar el PMSG a la red eléctrica de la Empresa Eléctrica Quito.

**PALABRAS CLAVE:** Emulador de energía eólica, dinamómetro, máquina de imanes permanentes, seguimiento del punto de máxima potencia MPPT, convertidores con IGBTs, lazo de enclavamiento de fase PLL, modulación vectorial espacial.

## ABSTRACT

The present work is about the operating analysis of a wind energy emulator acquired by the National Polytechnic School. Knowing the importance nowadays the renewable generation sources are, it is beneficial to work and understand much more how it can help to improve the Ecuadorian electrical system and the environment. The wind energy emulator of the Laboratorio Físico de Sistemas Eléctricos de Potencia has enough modules to allow the simulation of a wind generator; from the simulation of the wind turbine, a speed multiplier box, AC/DC and DC/AC converters as well as a coupling transformer, in addition to the software required for operation and paralleling to the grid.

The wind energy emulator has a four-quadrant dynamometer/power supply that allows wind turbine simulation, connected to a permanent magnet machine forms a PMSG, which allows reaching speeds around 6000 rpm. The PMSG connects an AC/DC-DC/AC conversion system that allows the conversion of the PMSG voltage to the grid voltage, using two control techniques: the first one known as maximum power point tracking (MPPT), which will control the generator side using current signals from the stator of the permanent magnet machine. This technique has the function of finding the optimum speed and torque at which the generator can enter the EEQ network, without causing risks, or find the speed of the generator when it has found the point of maximum power, while the other technique is the control of the interlocking loop phase for its acronym in English (PLL) that controls the network side and its function is to analyze the voltage, phase angle and frequency with which the network is, in order to couple the PMSG to network of the Quito electric utility.

**KEYWORDS:** Wind power emulator, dynamometer, permanent magnet machine, MPPT maximum power point tracking, converters with IGBTs, PLL phase-locked loop, space vector modulation.

# 1. INTRODUCCIÓN

Se inicia con una revisión de los principios de funcionamiento de las cuatro fuentes de generación existentes en el Laboratorio Físico de Sistemas Eléctricos de Potencia, que son: Instalaciones desde el transformador de la red de la EEQ, Emulador Eólico, Grupo Motor-Generador y Generador Fotovoltaico. Luego, se profundizará el estudio del emulador de generación eólica con su módulo de la máquina sincrónica de imanes permanentes PMSG (por sus siglas en inglés) así como los módulos necesarios para su funcionamiento.

Se procede a verificar el funcionamiento del emulador de energía eólica como una de las fuentes de generación del sistema de potencia a escala, disponible en el Laboratorio Físico de Sistemas Eléctricos de Potencia. La fuente que emula la turbina eólica es el dinamómetro de cuatro cuadrantes, en tanto que el generador es una máquina sincrónica de imanes permanentes. Los módulos requeridos del sistema LVDAC/EMS para el funcionamiento del emulador son: rectificador e inversor con IGBTs, puente de corriente continua, banco de capacitores, dinamómetro de cuatro cuadrantes/fuente de alimentación, inductores de línea, transformador trifásico, interfaz de adquisición de datos y control de datos DACI (por sus siglas en inglés). Las cargas son alimentadas a través de los corredores de transformación y transmisión eléctrica. La adquisición y registro de datos está a cargo de la instrumentación computarizada existente en los equipos FESTO del Laboratorio.

Se procede a operar de forma individual el aerogenerador, sin y con varias cargas, así como también a ponerlo en paralelo con la red eléctrica de la EEQ, para comprobar la factibilidad de la operación en paralelo de estas dos fuentes de generación eléctrica disponibles en el Laboratorio.

Se establece un procedimiento adecuado que permita la conexión del emulador de generación eólica, con la máquina de imanes permanentes, en paralelo con la red de la EEQ.

## 1.1 Objetivo general

Implementar la operación en paralelo del emulador de energía eólica del Laboratorio Físico de Sistemas Eléctricos de Potencia con la red de la Empresa Eléctrica Quito, con el fin de adquirir datos que permitan comprobar su factibilidad operativa como otra fuente de generación eléctrica para el estudio de sistemas eléctricos de potencia.

## 1.2 Objetivos específicos

1. Revisar los principios de funcionamiento de las cuatro fuentes de generación disponibles en el Laboratorio de Sistemas Eléctricos de Potencia.
2. Revisar los programas computacionales utilizados por el emulador de energía eólica para facilitar la conexión con la red eléctrica de la EEQ, a saber: Punto de Máxima Potencia (por sus siglas en inglés MPPT) y Lazo de Enclavamiento de Fase (por sus siglas en inglés PLL).
3. Establecer un procedimiento adecuado que permita la conexión en paralelo del emulador de generación de energía eólica con la red de la EEQ.
4. Verificar el funcionamiento del emulador de energía eólica como una de las fuentes de generación del sistema de potencia del Laboratorio Físico de Sistemas Eléctricos de Potencia.

## 1.3 Alcance

Se realiza una descripción de los principios de funcionamiento de las cuatro fuentes de generación existentes en el Laboratorio Físico de Sistemas Eléctricos de Potencia, que son: Instalaciones desde el transformador de la red de la EEQ, emulador eólico, grupo motor-generator y generador fotovoltaico. Se pone mayor énfasis en una descripción detallada del emulador de energía eólica con su módulo de la máquina sincrónica de imanes permanentes PMSG, además se detallan los módulos del sistema de rectificación/inversión full converter, interfaces de adquisición de datos DACI, cortador/inversor con IGBTs, dinamómetro/fuente de alimentación de cuatro cuadrantes como emulador de la fuente de energía eólica; así como, se estudia el funcionamiento del sistema de administración de energía LVDAC-EMS.

Se elabora un procedimiento para permitir la puesta en paralelo de la red de la EEQ con el emulador de generación de energía eólica, utilizando todos los módulos relacionados, así como las conexiones e instrumentos requeridos para su operación como generador eólico. Se procede a comprobar la factibilidad de operación en paralelo del emulador de generación eólica mediante la operación del módulo de cálculo del punto de máxima transferencia de potencia y del lazo de enclavamiento de fase PLL con la red de la EEQ.

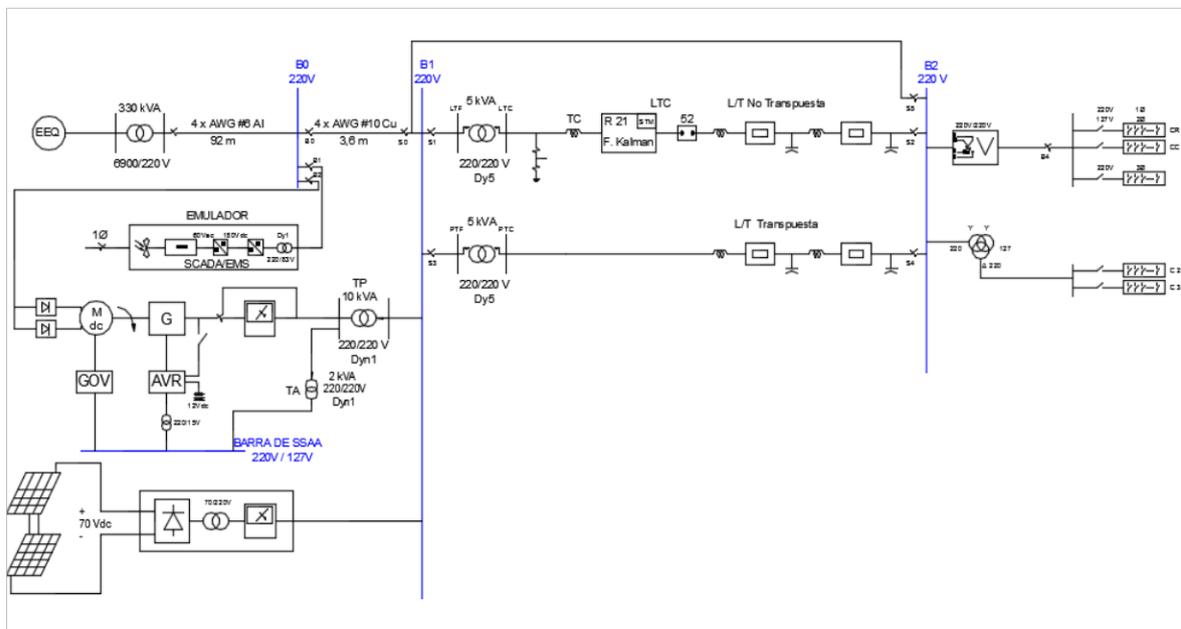
A través de una serie de pruebas de funcionamiento de las dos fuentes de generación se realizan informes con datos de niveles de voltaje, magnitudes de corriente, niveles de armónicos de corriente y voltaje, valores de potencia activa y reactiva transferidos a la

carga eléctrica, pérdidas de potencia activa y reactiva en los equipos eléctricos en operación individual y en operación en paralelo.

## 1.4 Marco teórico

El Laboratorio Físico a Escala de Sistemas Eléctricos de Potencia cuenta con cuatro fuentes de generación que son: las instalaciones desde el transformador de la red de la EEQ, el emulador de generación eólica, el grupo motor-generator y el generador fotovoltaico. Además, se cuenta con el diagrama unifilar del laboratorio en el cual se aprecia las cuatro fuentes de generación, los corredores de transformación y transmisión, barras, tipos de cable utilizado, entre otras cosas.

La Figura 1 presenta el diagrama unifilar del Laboratorio Físico a Escala de Sistemas Eléctricos de Potencia.



**Figura 1.** Diagrama Unifilar del Laboratorio Físico de Sistemas Eléctricos de Potencia

### 1.4.1 Resumen de los Principios de Funcionamiento de las Cuatro Fuentes de Generación Disponibles en el Laboratorio Físico de Sistemas Eléctricos de Potencia

#### 1.4.1.1 Instalaciones desde el transformador

EL edificio de Química-Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional cuenta con un cuarto de transformación en el subsuelo, en el cual se encuentra un transformador de la Marca Intra Industria Andina de Transformadores Cía. Ltda.

El transformador cuenta con las siguientes especificaciones de la Tabla 1:

**Tabla 1.** Especificaciones del transformador

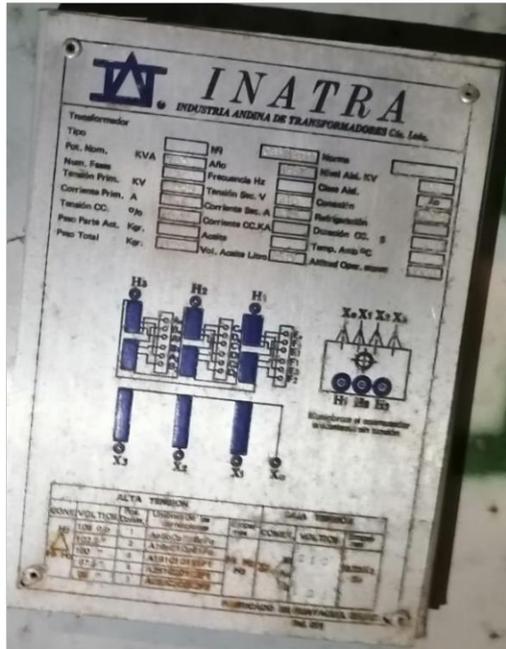
Transformador INATRA	
Potencia nominal	300 kVA
Número de fases	3
Tensión en el primario	6000 kV
Corriente el primario	26,3 A
Tensión CC. %	3,97
Tensión en el secundario	210 V
Corriente en el secundario	8,2 A
Conexión	$\Delta Y5$

El transformador es del año de 1987, los pocos datos que se presentan son los que se alcanzan a divisar, debido a que la placa se encuentra sucia y deteriorada.

Se muestra un conjunto de gráficas del transformador en la Figura 2.



**Figura 2.** Transformador INATRA de la red de la EEQ



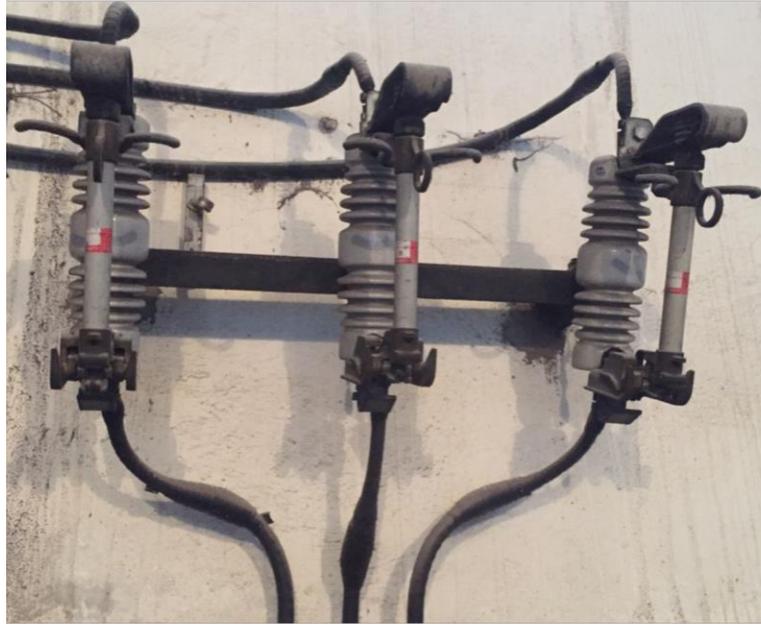
**Figura 3.** Datos de placa del transformador INATRA

Además, el cuarto de transformación cuenta con dos transformadores de potencial de la marca HITACHI – LINE, como se muestra en la Figura 4.



**Figura 4.** Transformadores de potencial

Cuenta con tres seccionadores de potencia, uno por cada fase como se muestra en la Figura 5.



**Figura 5.** Seccionadores de potencia

#### **1.4.1.2 Emulador Eólico**

El Emulador de Energía Eólica permite simular el comportamiento del viento el cual mueve las aspas de un aerogenerador, mediante la implementación de varios equipos y un software permiten recrear la generación que se pueda obtener de una central renovable como la eólica. El emulador está conformado por un dinamómetro de cuatro cuadrantes el cual tiene la función de hacer las veces de una turbina eólica, cuenta con un generador de imanes permanentes y un sistema de conversión AC/DC-DC/AC [1].

Como se dijo anteriormente este emulador de energía eólica cuenta con una máquina de imanes permanentes (por sus siglas en inglés Permanent Magnet Synchronous Machine) y una máquina de inducción de rotor doblemente alimentado (por sus siglas en inglés DFIG), además cuenta con dispositivos de hardware y software que permiten la implementación de un sistema de generación eólica.

Los datos de las dos máquinas que conforman el Emulador de Generación Eólica se presentan a continuación [2]:

- Datos de placa de la Máquina Síncrona de Imanes Permanentes

**Tabla 2.** Datos de placa de la Máquina Síncronica de Imanes Permanentes

<b>MOTOR</b>	
Velocidad Nominal	6000 r.p.m
Corriente Nominal	3 A
Potencia Nominal	260 W
Torque Nominal	0,41 N.m (3,6 lb.in)
Codificador Digital	2048 pulsos por revolución – 0/5 Vdc diferencial
Voltaje de barra del inversor	160 V
Fuerza Contra Electromotriz	10,4 Vrms/1000 r.p.m
Dimensiones	308 x 291 x 440 mm (12,1 x 11,5 x 17,3 in)

- Datos de placa de la Máquina de Inducción de Imanes Permanentes

**Tabla 3.** Datos de placa de la Máquina de Inducción de Imanes Permanentes

Número de Fases	3
Frecuencia	60 Hz
Voltaje Nominal	120/208 V
Velocidad Subsíncronica	1720 r.p.m
Velocidad Hipersíncronica	1875 r.p.m
Protección Térmica con Termistor	10 kΩ LV type 2
Dimensiones	308 x 291 x 440 mm (12,1 x 115,5 x 17,3)
Protección de Sobrevoltaje del Rotor	
<b>MOTOR</b>	
Voltaje del Rotor	360/624 V
Voltaje de Estator	120/208 V
Potencia Mecánica	200 W
Factor de Potencia	0,64 atraso
Corriente Nominal	1,15 A
<b>GENERADOR</b>	
Voltaje de Rotor	360/624 V
Voltaje del Estator	120/208 V
Potencia Nominal	200 W
Potencia Aparente	480 V
Factor de Potencia	0,41 atraso

Corriente Nominal	1,33 A
Velocidad	1800 r.p.m.

Además, el emulador cuenta con una serie de componentes entre software y hardware, que son [3]:

- Interfaz de Adquisición y Control de Datos LabVolt Series 9063-02
- Dinamómetro de Cuatro Cuadrantes/Fuente de Alimentación LabVolt Series 8660-22
- Módulos Cortador/Inversor con IGBTs 8837-B2
- Paquete de Batería de Plomo-Ácido LabVolt Series 8808-12
- Carga Resistiva LabVolt Series 8311-02

#### **1.4.1.3 Grupo Motor-Generador**

El grupo Motor-Generador está constituido por dos máquinas independientes: la primera máquina de corriente continua que sirve como máquina motriz que tiene como objetivo la operación como turbina de una central eléctrica; y la segunda máquina es de rotor bobinado la cual tiene como objetivo trabajar como generador, la cual abastecerá de energía eléctrica en el momento en el que el motor tenga movimiento de rotación para transformar energía mecánica en energía eléctrica. El grupo que se va a formar es de un motor DC-Generador sincrónico de una capacidad de 7 kVA, un voltaje de 220V, factor de potencia de 0,87 en atraso (-), en conexión Y-tierra [4].

La máquina de inducción de rotor bobinado cuenta con dos devanados para corriente alterna, el estator constituye el devanado primario que se conecta a la red eléctrica y el devanado del rotor constituye el devanado secundario. El rotor cuenta con 54 números de ranuras, bobinado de doble capa imbricado y de 1-9 paso polar fraccionario, mientras que para el estator se tiene 72 números de ranuras, tipo de bobinado imbricado de doble capa y paso polar fraccionario de 1-12. La máquina de corriente continua es de 4 polos, su rotor cuenta con 87 delgas y 29 ranuras [4].

El grupo motor DC-generador sincrónico está montado en un chasis, este chasis es de construcción de tipo U de medidas 150 x 150 x 6 cm, este soporte es de tipo desarmable, para poder ser movilizado de mejor manera, este grupo motor DC-generador está perfectamente equilibrado, para esto hay que tener en cuenta que el motor de corriente

continua es la parte fija en la alineación, mientras que el generador es la parte que se va a ajustar o la parte móvil [4].

#### 1.4.1.3.1 Motor DC

Para la obtención de la velocidad sincrónica del generador será necesario llegar a los valores que se presenta en la Tabla 4, en las que se presentan los valores requeridos para que el generador trabaje a una potencia mecánica necesaria para generar 220 V a una frecuencia de 60 Hz en vacío [4].

**Tabla 4.** Valores del motor DC que permiten alcanzar la velocidad sincrónica del generador

Potencia	10 HP
Voltaje de armadura [ $V_{DC}$ ]	186 V
Voltaje de campo [ $V_{DC}$ ]	130 V
Corriente nominal [A]	5,15
Corriente nominal de la armadura [A]	1,07
Velocidad [r.p.m.]	1200
Tipo de conexión	Compuesto aditivo

Mientras que la Tabla 5 muestra los valores de resistencia para devanados de campo y de armadura del motor DC [4].

**Tabla 5.** Valores de resistencia de los devanados del motor DC

Devanados	Resistencia [ $\Omega$ ]	Voltaje [ $V_{DC}$ ]	Corriente [ $A_{DC}$ ]
Serie $R_s$	163,7	149,8	0,914
Campo $R_f$	0,112	0,424	3,701
Armadura con Interpolos $R_{ab}$	0,519	2,131	4,104

Mientras que los valores de impedancia e inductancia para los bobinados del motor están dados por la Tabla 6 [4].

**Tabla 6.** Valores de impedancia e inductancia del motor DC

Devanados	Impedancia [ $\Omega$ ]	Inductancia [mH]
Serie $R_s$	2630,5 < 55,18°	0,00559
Campo $R_f$	0,49668 < 51,48°	1,0308
Armadura con Interpolos $R_{ab}$	2,9661 < 73,87°	7,5538

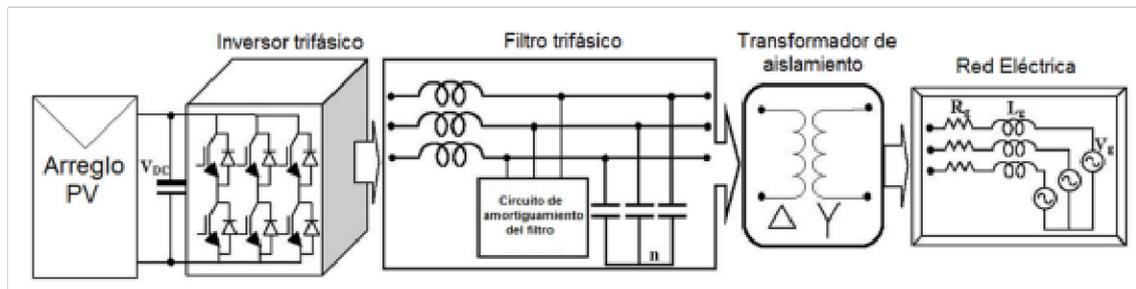
La Tabla 7 muestra los valores de las resistencias de los bobinados del generador sincrónico [4].

**Tabla 7.** Datos de resistencia de las bobinas del generador sincrónico

Devanados	Resistencia [ $\Omega$ ]	Voltaje DC [V]	Corriente DC [A]
Campo $R_f$	0,570	2,673	5,272
Armadura $R_{an}$	0,206	0,889	4,312
Armadura $R_{bn}$	0,204	0,894	4,380
Armadura $R_{cn}$	0,205	0,884	4,312

#### 1.4.1.4 Generador Fotovoltaico

El Laboratorio Físico de Sistemas Eléctricos de Potencia cuenta con un generador fotovoltaico, el cual está constituido por un sistema fotovoltaico y convertidores DC/CA, algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT), filtros que permiten la obtención de una señal sinusoidal y un algoritmo que permite la técnica del lazo de enclavamiento de fase (PLL). Además, cuenta con un circuito de control del inversor trifásico en base a optoacopladores y controladores de frecuencia (Gate Drivers), cuenta con un circuito de potencia del inversor trifásico basado en transistores bipolares de puerta aislada (IGBTs) [5].



**Figura 6.** Diagrama del Sistema Fotovoltaico [5]

El control se programó en el microcontrolador F28377S de Texas Instruments, el cual cuenta con un algoritmo MPPT que permite la obtención de la máxima potencia disponible de los paneles solares, además de un algoritmo que permite la realización de la técnica PLL para realizar la sincronización del generador fotovoltaico con la red. El sistema cuenta con un transformador de taps trifásico elevador que tiene la finalidad de elevar el voltaje de salida del inversor trifásico de 750 VA con una relación de transformación de 40/220 V.

El generador fotovoltaico presenta una topología de inversor central más conocida como sistema fotovoltaico de una etapa, que es capaz de manejar el MPPT, la conversión de

corriente continua a alterna y poder controlar la corriente en la red y el aumento de voltaje. Para la unidad de control y procesamiento se utiliza una tarjeta desarrollada por Delfino de la familia C2000 de Texas Instruments en la cual se encuentra el microcontrolador TMS320F28377S, esta tarjeta cuenta con un emulador JTAGXDS100v2 que permite cargar programas y sesiones de depuración mediante el uso de un computador que contenga el software Code Composer Studio [5].

Ademas, Texas Instrument cuenta con una biblioteca Solar para aplicaciones fotovoltaicas en el software Control Suite, en esta biblioteca se encuentran funciones como transformadas de Park, Clarke, controladores PI, PID, lazos de enclavamiento de fase trifásicos y monofásicos, generadores de rampa, entre otros. En la Tabla 8 se puede apreciar las características de la tarjeta F28377S de la compañía Texas Instruments [5].

**Tabla 8.** Tarjeta F28377S de Texas Instrument

<b>Componente</b>	<b>Característica</b>
CPU	32-bit a 200MHz, unidad matemática trigonométrica, unidad de punto flotante, unidad viterbi/complejos
PWM	24 salidas mejoradas de PWM con tiempos muertos y reloj hasta 100 MHz
ADC	4 convertidores, 16 canales, 12-16 bits. Lecturas controladas por timer, PWM e interruptores
MEMORIA	1 MB FLASH, 164 KB de RAM

El generador fotovoltaico cuenta también como [5]:

- Semiconductores de potencia los cuales son utilizados en los inversores como: BJT, MOSFET e IGBTs
- Aislamiento para circuitos de disparo
- Circuito de manejo de compuertas o drivers
- Sistema de Control Automático
- Una Unidad de Control y Procesamiento
- Sensores de corriente como: sensor ACS712 y SCT-013
- Sensores de voltaje: sensor de voltaje diferencial y de voltaje AC
- Filtros
- Transformador trifásico
- Protecciones para el inversor: protección de sobrevoltaje, protección de sobrecorriente para el IGBT, protección de sobrecorriente en la carga

## 2 METODOLOGÍA

Para poder estudiar la factibilidad de la operación en paralelo del emulador de energía eólica del Laboratorio Físico de Sistemas de Potencia, se realizaron diferentes pruebas con el emulador, mediante el módulo de Interfaz de adquisición de datos y control se estableció el funcionamiento correcto del dinamómetro/fuente de alimentación en modo dinamómetro en conjunto con la Máquina Síncrona de Imanes Permanentes que entre ellos forma la PMSG.

Se realizan las pruebas en vacío del emulador de energía eólica sin conectar el convertidor AC/DC-DC/AC lo que permite comprobar que el emulador se encuentra funcionando de forma correcta. A continuación, se realizan pruebas del emulador conectando tres cargas resistivas de diferente valor, en el cual se tomaron datos de voltaje, corriente, potencia activa, armónicos de voltaje, frecuencia entre otros parámetros.

De igual manera se conecta el sistema de conversión AC/DC-DC/AC a la PMSG y se realizaron pruebas en vacío de las cuales se tomaron datos de voltaje en la barra DC, velocidad del PMSG, torque, voltaje en los terminales de estator de la Máquina de Imanes Permanentes, así como las formas de onda de voltaje producidas. Así mismo se realizaron pruebas con tres cargas resistivas de diferente valor de donde se obtuvieron datos de velocidad del emulador, torque, voltaje en los terminales del estator de la Máquina de Imanes Permanentes y voltaje en la Barra DC.

Y por último se realiza la conexión adecuada para poder ingresar el emulador en paralelo con la red de la EEQ, el software LVDAC-EMS utilizado para manejar el emulador permite apreciar la conexión en modo Emulador como Aerogenerador el cual nos permite simular una la generación eólica, el emulador cuenta con el sistema de seguimiento del punto de máxima potencia (por sus siglas en inglés MPPT) y el sistema lazo de enclavamiento de fase (por sus siglas en inglés PLL) los cuales permiten la conexión adecuada del generador eólico con la red de la EEQ, se debe considerar que el MPPT funciona del lado del generador y el PLL funciona del lado de la red de la EEQ. Se verificó los voltajes que se presentan en la red de la EEQ, así como sus ángulos de fase, se tomaron valores de voltaje, corriente, potencia activa y reactiva, armónicos de voltaje y corriente, frecuencia en el lado del generador y en el lado de la red.

## 2.1 Descripción del seguimiento del punto de máxima potencia MPPT

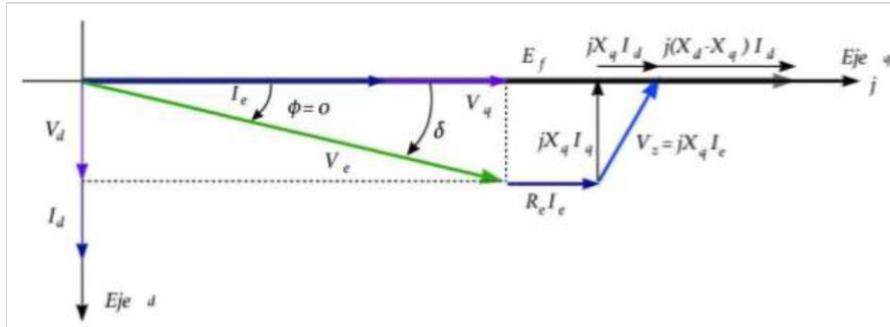
El Emulador de Energía Eólica utiliza el control vectorial para accionar la PMSG, por tal motivo es que se utiliza la técnica de Control de Campo Orientado (por sus siglas en ingles FOC-SVM Field Oriented Control-Space Vector Modulation) lo que realiza esta técnica es utilizar la posición exacta de la máquina y las mediciones de corriente para poder generar los vectores que se requieren de voltaje de salida en cada periodo de modulación [1].

El objetivo principal del FOC es el desacoplamiento del flujo magnético con torque electromagnético para poder tener control separado; por lo que la estrategia de control es considerar la corriente  $I_d = 0$  con lo que el generador solo operé en la región de flujo constante.

El FOC ayuda a controlar las componentes del estator las cuales deberán estar representadas mediante un vector en el sistema de referencia  $dq$ , el mismo que se encuentra alineado con el flujo del rotor. Se utiliza ecuaciones dinámicas del modelo de la PMSG para realizar el control vectorial, lo que da como resultados corrientes y voltajes instantáneos, a estas variables se le incluye la velocidad para la obtención de las variables de entrada del SVM [1].

Para poder lograr esto, se hace uso de la transformada de Clark la cual utiliza las fases  $I_a, I_b$  e  $I_c$  para poder calcular las corrientes de dos fases ortogonales al eje del estator  $I_\alpha$  e  $I_\beta$ . Como ya se mencionó para poder aplicar el FOC es necesario que las corrientes estén en un sistema  $dq$  por lo que es necesario utilizar la transformada de Park que permite obtener las corrientes  $I_d$  e  $I_q$ , la ventaja que se da al trabajar con la Máquina Síncrona de Imanes Permanentes es que dichos imanes generan la característica de flujo magnético propio del rotor que a su vez será constante, lo que permite que el valor de  $I_d$  se puede fijar en cero [1].

En la Figura 7 se aprecia el diagrama fasorial para la estrategia de FOC con el control de  $I_d = 0$ .



**Figura 7.** Diagrama Fasorial para la técnica FOC [1]

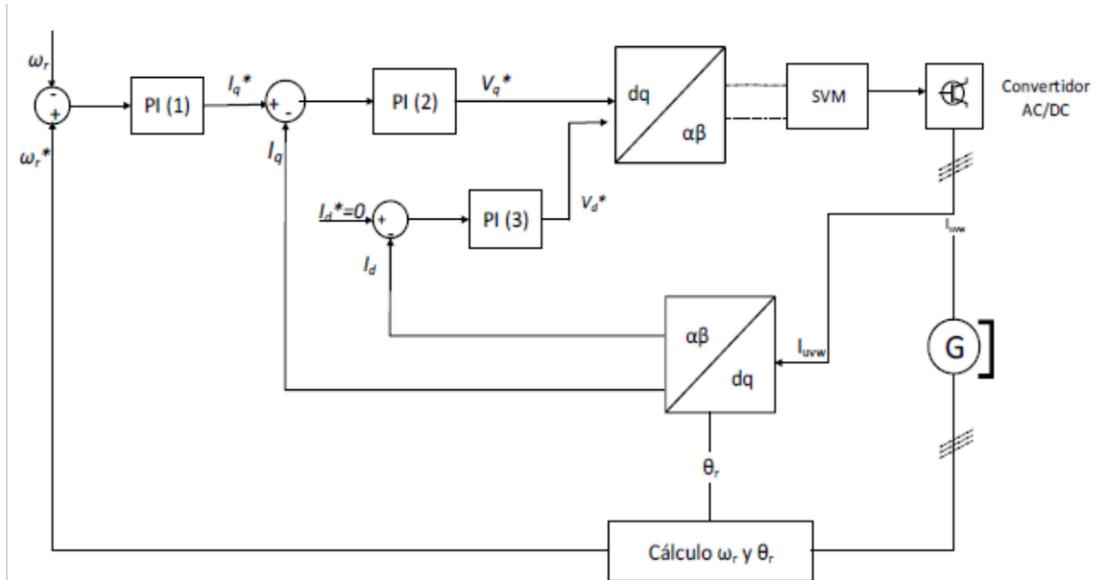
La ecuación 2.1 permite apreciar como el generador desarrolla un torque electromagnético el cual será proporcional a la corriente en el eje de cuadratura [1].

$$T_e = \frac{3}{2} \phi \cdot i s_q \quad (2.1)$$

Debido a este concepto es que se puede ejercer control sobre la corriente  $I_q$  para poder obtener el valor del torque electromagnético.

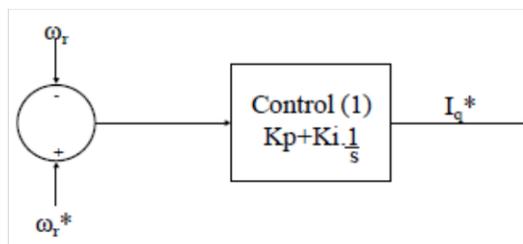
El software LVDAC-EMS permite establecer la función de Emulador como Aerogenerador, dicha función tiene implementado un algoritmo para realizar el control vectorial de campo orientado, este tipo de algoritmo toma como entradas las mediciones de corriente del estator y la posición del rotor la cual se estima mediante sensores con los que cuenta la máquina. La técnica de control vectorial está compuesta de tres lazos; un lazo externo que permite el control de velocidad y dos lazos internos que permiten en control de flujo magnético.

Los dos lazos internos están regulados por dos controladores PI (Proporcional Integral) mientras que el lazo de velocidad está conectado en cascada con los otros dos lazos. La retroalimentación al lazo de velocidad se realiza tomando la señal emitida por el sensor que da la posición del rotor el cual pasa por un convertidor de posición de velocidad como se aprecia en la Figura 8 [1].



**Figura 8.** Diagrama de bloques del control vectorial del rectificador [1]

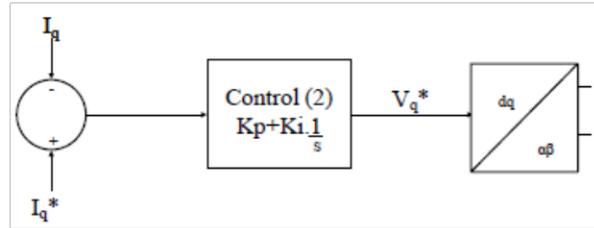
En la Figura 9 se aprecia el lazo de control de velocidad.



**Figura 9.** Lazo de control de velocidad [1]

Este diagrama de bloque permite calcular el error entre la velocidad del rotor  $\omega_r$  y el comando de velocidad  $\omega_r^*$  que va a ingresar en el control (1) para poder obtener a la salida la corriente  $I_q^*$  que se requiera para establecer el voltaje requerido en el rectificador.

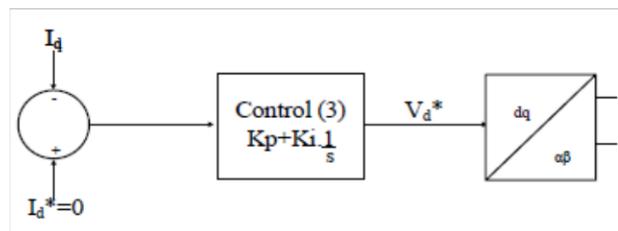
En la Figura 10 se presenta el lazo de control del torque.



**Figura 10.** Lazo de control de torque [1]

La estrategia mencionada para la técnica FOC de establecer  $I_d = 0$  permite actuar sobre el valor de  $I_q$  para poder obtener el valor de corriente requerido, las señales de entrada que corresponden a este lazo son la obtenida en el control 1 y la corriente  $I_q$  medida en el generador. Al igual que en el anterior lazo lo que se hace es encontrar el error de  $I_q$  mediante el sumador, este valor de error ingresa en el control (2) cuya salida será la que corresponde " $V_q$ " de la señal moduladora [1].

Por último, se presenta el lazo de control de flujo magnético en la Figura 11.



**Figura 11.** Lazo de control del flujo magnético [1]

Ya que los imanes permanentes tienen la característica de generar una magnetización propia este lazo operará con un flujo constante, por lo que  $I_d^*$  toma un valor de cero, con lo cual únicamente se tendrá el valor de la corriente  $I_d$  que se mide en la máquina. Este valor de corriente  $I_d$  será el que ingrese al control (3) y así se obtiene la componente " $V_d$ " en el voltaje de la señal moduladora. Obtenidas las señales  $V_q$  y  $V_d$  de la señal moduladora se realiza la transformación al sistema de coordenadas "abc" para así obtener que el rectificador abastezca la corriente necesaria en la barra DC que permita mantener el voltaje requerido, así como el valor de potencia reactiva en cero.

Estos diagramas de bloque presentados fueron realizados en base a Emulador de Energía Eólica.

Se puede apreciar el diagrama que presenta el software LVDAC-EMS en la Figura 12.

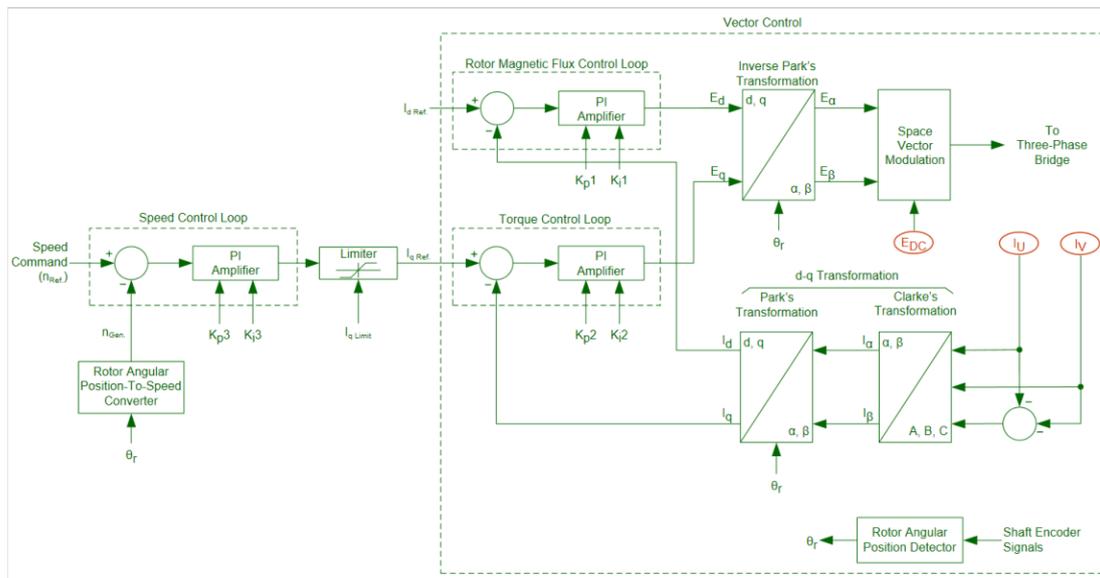


Figura 12. Control del MPPT y Técnica FOC [3]

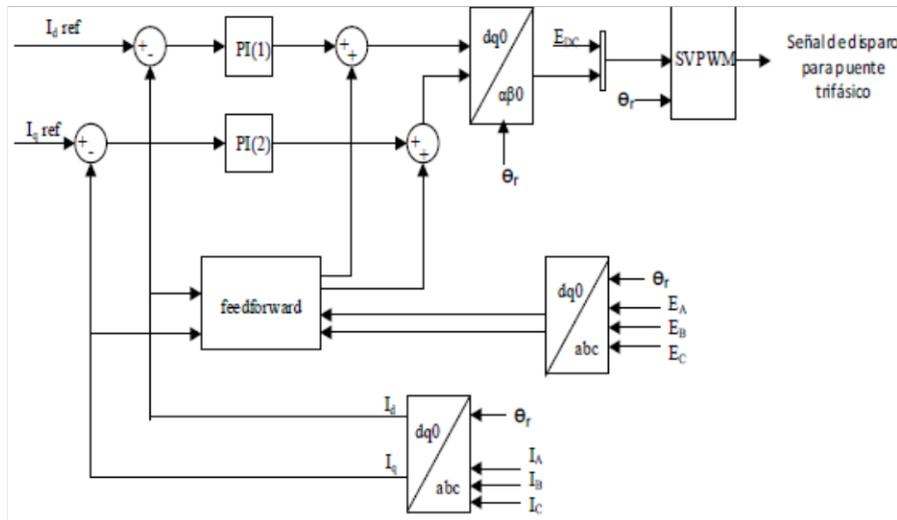
## 2.2 Descripción del lazo de enclavamiento de fase PLL

Se tiene el inversor trifásico de potencia el que cumple la función de acoplar la señal de salida del generador a la frecuencia del sistema eléctrico de 60 Hz. Esto se logra mediante la PWM que es la técnica de modulación de ancho de pulso que va a actuar sobre la señal del generador ya rectificadas. La PWM está formada gracias a la modulación vectorial espacial SVM lo que permite el disparo de los IGBTs a diferentes anchos de pulso, los cuales dependiendo de la señal de voltaje se reducirán o ampliarán, lo que permite que se forme la onda sinusoidal a la frecuencia de la red de la EEQ o del sistema al que se lo vaya a conectar. El sistema de inversor trifásico de potencia cuenta con el lazo de enclavamiento de fase (por sus siglas en inglés Phase Locked Loop PLL) el cual tiene la función de realizar la sincronización de la señal de voltaje a la salida del inversor con la señal de voltaje de la red eléctrica [1].

El objetivo principal del lazo de control PLL es realizar una comparación de la frecuencia y las fases de las señales de voltaje, este lazo de control es no lineal por lo que permite el cambio en la frecuencia de la señal de salida en función de la frecuencia y la fase de la señal de entrada. De esta manera es como se puede acoplar el voltaje que entrega el aerogenerador y el sistema con el que se le vaya a conectar.

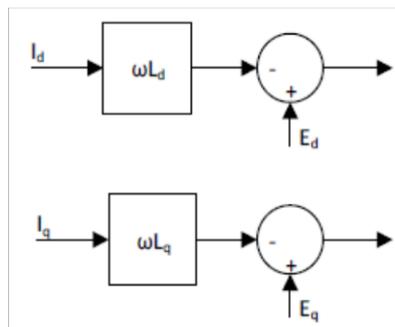
Para el inversor se tiene dos lazos de control de corrientes activa y reactiva, para tener un mejor rendimiento del controlador se cuenta con un lazo predictivo de voltaje. Se tiene para cada lazo de control de las corrientes un amplificador tipo PI, al cual van a ingresar las

desviaciones entre las señales de corriente en el sistema de ejes d-q y las que se van a tomar de la red en los ejes de cuadratura y directo, como se muestra en la Figura 13 [1].



**Figura 13.** Diagrama de bloques del control del inversor [1]

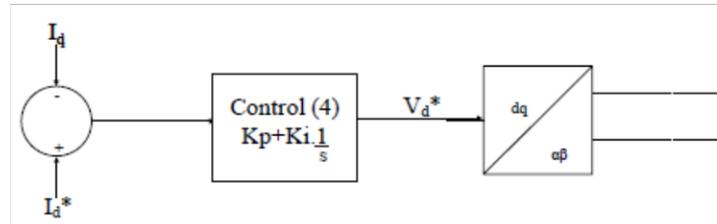
El lazo de control predictivo que es el feedforward, usa la ganancia en función de la reactancia de choque a la salida del inversor en los ejes de cuadratura y directos, para así obtener una comparación entre los voltajes tomados de la red y establecer un error que permita actuar si se presenta una posible perturbación, modificara el voltaje en la salida del generador para poder establecer una correcta operación en estado estable lo que se aprecia en la Figura 14 [1].



**Figura 14.** Lazo de control predictivo [1]

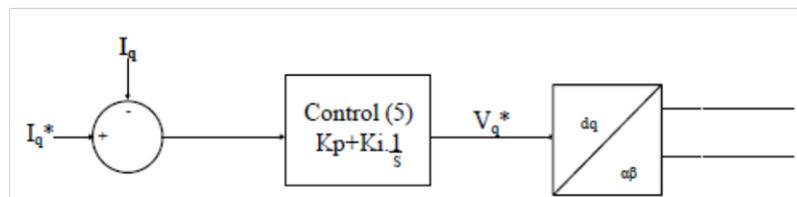
Como se observa en la Figura 14 para el control de la componente "d" de voltaje se hace uso del primer lazo, en la Figura 15 el sumador permite restar el valor de  $I_d$  de  $I_d^*$ . Donde  $I_d^*$  viene hacer la componente "d" de la corriente que se toma como referencia que es la que se requiere inyectar a la red, por lo que  $I_d$  será la corriente que resulte del cambio de coordenadas "dq0" la corriente medida a la salida del inversor, el error calculado va a ingresar en el control (4) con lo que se obtiene la componente "d" de voltaje, el cual será el

valor que se debe inyectar para poder obtener la salida requerida, el voltaje encontrado será transformado al sistema de coordenadas “ $\alpha\beta$ ” la señal obtenida servirá para la modulación y así se puede obtener el control requerido [1].



**Figura 15.** Lazo de control de la corriente  $I_d$  para el inversor [1]

Mientras que para poder realizar el control sobre la componente “q” de la onda modulada se lo realiza con el segundo lazo de la Figura 14, el procedimiento de control es similar al realizado para la componente “d”. En la Figura 16 se aprecia como el sumador realiza la resta entre  $I_{q^*}$  e  $I_q$  para que este error ingrese al control (5) y así obtener la salida requerida. Antes de que se realice la SVM se utilizan dos sumadores por cada eje (d y q), cada sumador obtiene un término que es utilizado para estimar el voltaje que cae en la inductancia de choque, esto permite calcular las componentes “d” y “q” del voltaje a la entrada del SVM [1].



**Figura 16.** Lazo de control de la corriente  $I_q$  para el inversor [1]

Estos diagramas de bloque presentados fueron realizados en base a Emulador de Energía Eólica.

Se puede apreciar el diagrama que presenta el software LVDAC-EMS en la Figura 17.

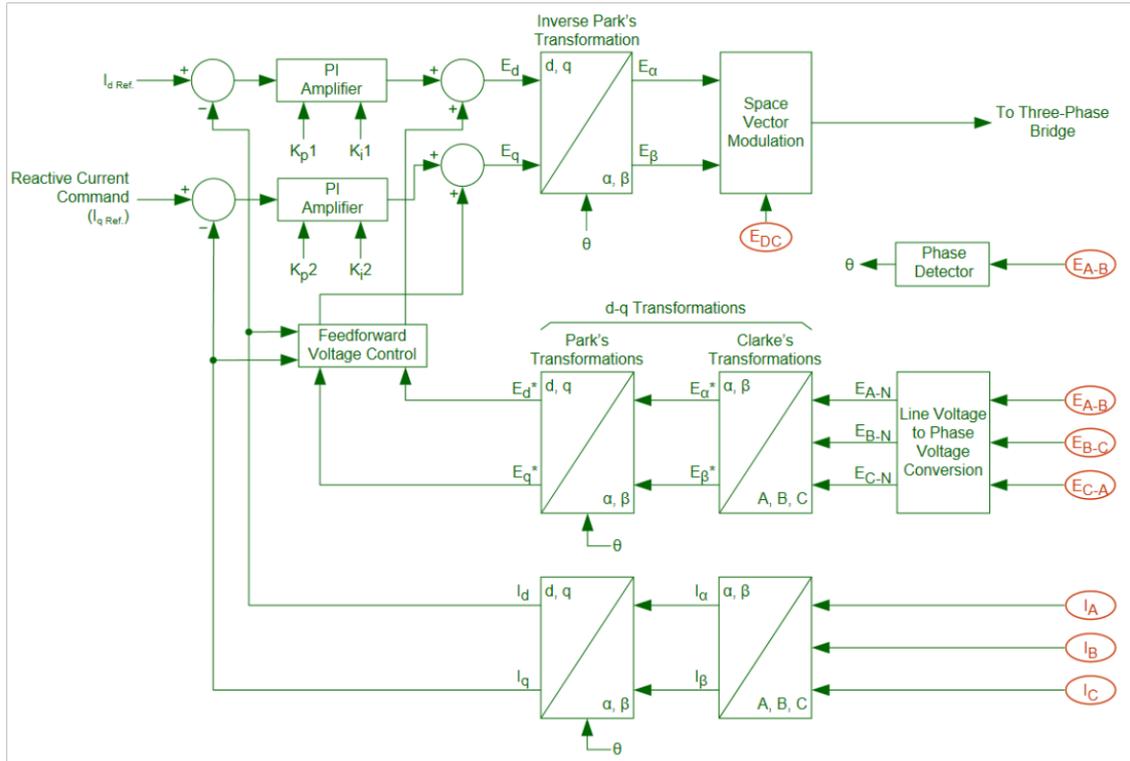


Figura 17. Control PLL del lado de la red [3]

### 2.3 Modulación vectorial espacial

El modelo del convertidor trifásico de voltaje se lo realiza mediante el uso de la transformada de Park a las ecuaciones de fase, estas son aplicables para el funcionamiento del convertidor.

En la Figura 18 se muestra el diagrama del inversor juntamente con un equivalente Thévenin de la red eléctrica [1].

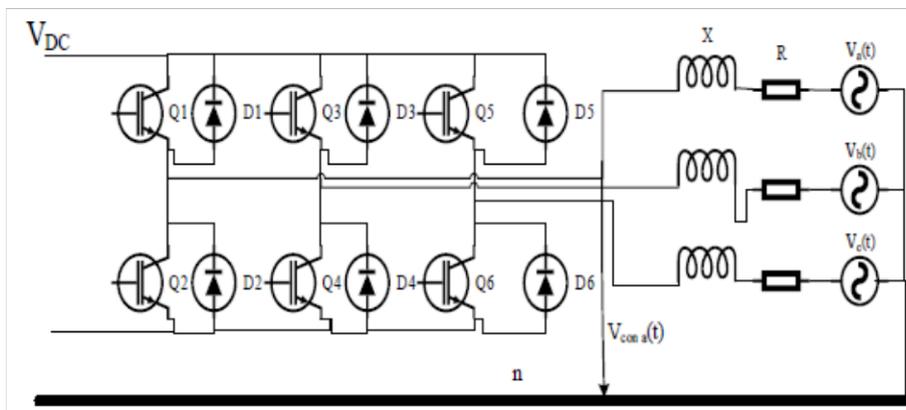


Figura 18. Diagrama del inversor con la red eléctrica [1]

La ecuación 2.1 representa a los equivalentes de voltaje de las fases del inversor en los ejes de referencia “abc”, se aplica la transformada de Clarke para obtener los equivalentes de voltaje en el sistema de referencia “αβ0” lo que se expresa en la ecuación 2.2 [1].

$$\begin{bmatrix} V_{con\_a} \\ V_{con\_b} \\ V_{con\_c} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$\overrightarrow{V_{\alpha\beta}} = V_{an} + V_{bn}e^{j\frac{2\pi}{3}} + V_{cn}e^{-j\frac{2\pi}{3}} \quad (2.2)$$

$$\overrightarrow{V_{\alpha\beta}} = \overrightarrow{V_{con\_αβ}} - R\overrightarrow{i_{αβ}} - L \frac{d\overrightarrow{i_{αβ}}}{dt} \quad (2.2)$$

Obteniendo la transformada trifásica sinusoidal a los ejes ortogonales fijos, se obtiene ya un vector ideal con módulo constante que va a girar a la velocidad de  $\omega$ . La modulación vectorial de pulsos lo que hace es buscar un vector de voltaje interno del convertidor que se muy similar al vector ideal. Se referencia las ecuaciones anteriores para un sistema arbitrario el cual ya se encuentre girando a la velocidad  $\omega$  para obtener la ecuación 2.3 [1].

$$\vec{V} = \overrightarrow{V_{con}} - R\vec{i} - L \frac{d\vec{i}}{dt} - j\omega L\vec{i}$$

$$V_d = V_{con\_d} - Ri_d - L \frac{di_d}{dt} + \omega i_q L \quad (2.3)$$

$$V_q = V_{con\_q} - Ri_q - L \frac{di_q}{dt} + \omega i_d L$$

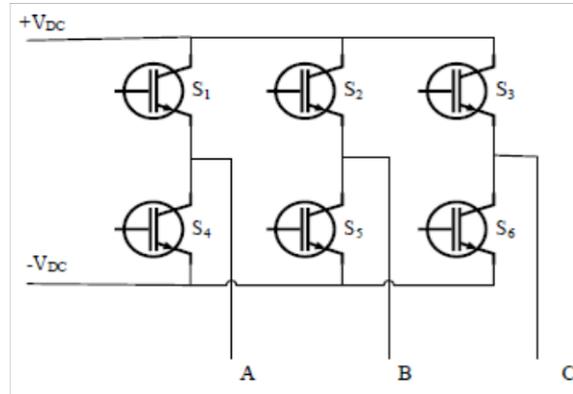
La técnica de modulación espacial vectorial SVM presenta características de valores de armónicos bajos y desempeños grandes en cuanto a procesos de conmutación, esto se debe a que los ángulos de disparo están basados sobre las proyecciones de los ejes d y q de voltaje respecto a una referencia que este girando a velocidad sincrónica con voltaje de salida del convertidor [1].

La inclusión de esta técnica de modulación en el sistema aerogenerador-red permite que el aerogenerador trabaje de forma óptima para velocidades que sean menores de la nominal, la SVM permitirá la operación entorno al punto de máxima potencia.

### **2.3.1 Formación de los vectores espaciales**

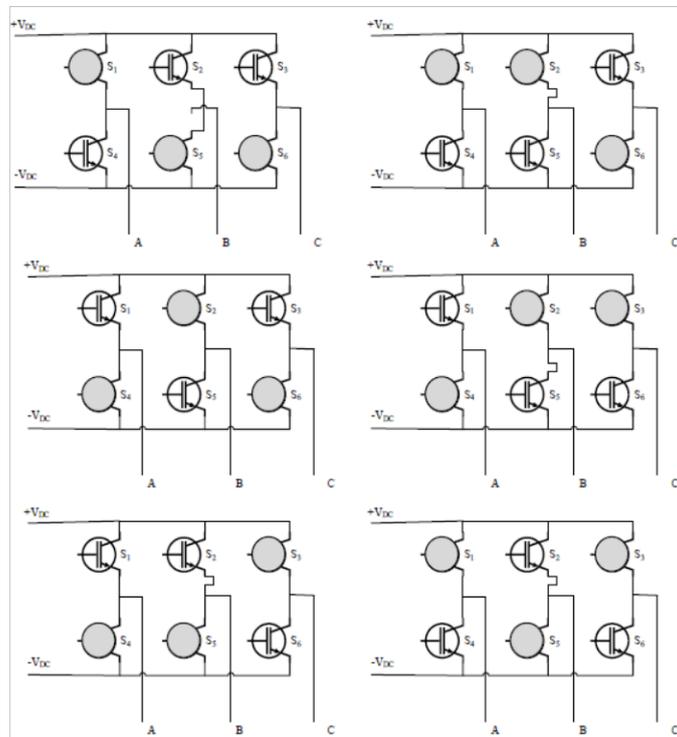
Para la formación de los vectores espaciales se tendrá en cuenta los estados de conmutación de los IGBTs que se encuentren en cada rama de los convertidores trifásicos.

En la Figura 19 se muestra un convertidor tipo inversor, el cual está formado por tres brazos y en cada uno de estos dos IGBTs, dependiendo de los estados de conmutación de los IGBTs se determinarán los límites y zonas de la SVM [1].



**Figura 19.** Inversor trifásico con pares de conmutación S1-S4, S2-S5, S3-S6 [1]

Como se puede observar existen 8 posibilidades de estados, entre estas hay dos nulos (1,1,1) y (0,0,0) y seis estados que permiten la conducción (1,0,0), (1,1,0), (0,1,0), (0,1,1), (0,0,1), (1,0,1) lo que se puede apreciar en la Figura 20.



**Figura 20.** Estados de conducción [1]

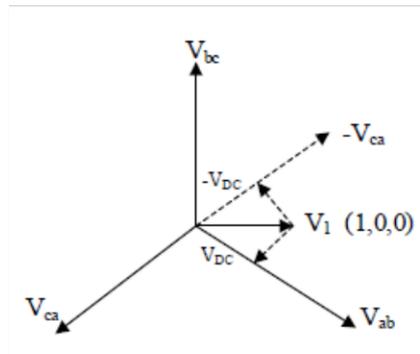
Como se observa en la Figura 16 la determinación de los estados de conducción del convertidor está dada por la identificación de los tres IGBTs superiores y sus

correspondientes estados. Dependiendo de cada posible conmutación se puede obtener voltajes en la etapa de continua  $V_{DC}$ , lo que se aprecia en la Tabla 9 [1].

**Tabla 9.** Conmutación S1-S2-S3 para voltajes de línea y voltajes correspondientes a los estados activos

<b>Estado</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
(S1, S2, S3)	(1,0,0)	(1,1,0)	(0,1,0)
$(V_{ab}, V_{bc}, V_{ca})$	$(V_{DC}, 0, -V_{DC})$	$(0, V_{DC}, -V_{DC})$	$(-V_{DC}, V_{DC}, 0)$
<b>Estado</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
(S1, S2, S3)	(0,1,1)	(0,0,1)	(1,0,1)
$(V_{ab}, V_{bc}, V_{ca})$	$(-V_{DC}, 0, V_{DC})$	$(0, -V_{DC}, V_{DC})$	$(V_{DC}, -V_{DC}, 0)$

Si se revisa el estado (1,0,0) y se aprecia los voltajes de línea generados  $V_{ab}$ ,  $V_{bc}$ ,  $V_{ca}$  con un desfase de  $120^\circ$ , se tendrá el voltaje efectivo  $V_1$ , lo que se muestra en la Figura 21 [1].



**Figura 21.** Voltaje efectivo para la primera combinación de conmutación [1]

Ya que no existe neutro en la etapa de continua con el neutro de la carga, se puede determinar que la suma de los voltajes fase-neutro es cero lo que se aprecia en la ecuación 2.4 [1].

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0$$

$$V_{an} = \frac{1}{3}(V_{ab} - V_{ca})$$

$$V_{bn} = \frac{1}{3}(V_{bc} - V_{ab}) \tag{2.4}$$

$$V_{cn} = \frac{1}{3}(V_{ca} - V_{bc})$$

Con la ecuación 2.4 se puede además determinar cada voltaje fase-neutro en función de los voltajes fase-fase, lo que se muestra en la Tabla 10 [1].

**Tabla 10.** Equivalentes de voltaje fase-neutro para estados activos

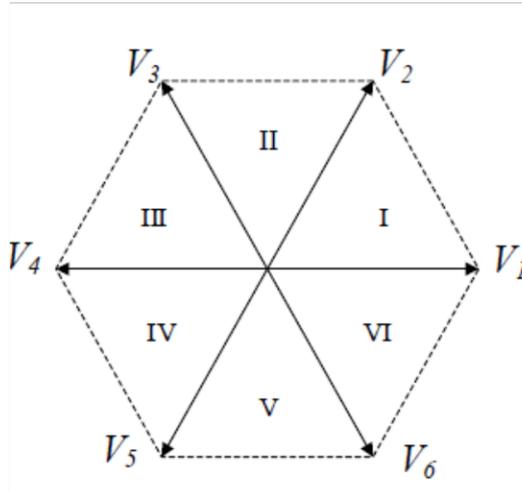
<b>Estado</b>	<b>1</b>	<b>2</b>
(S1, S2, S3)	(1,0,0)	(1,1,0)
$(V_{an}, V_{bn}, V_{cn})$	$(\frac{2V_{DC}}{3}, -\frac{V_{DC}}{3}, -\frac{V_{DC}}{3})$	$(\frac{V_{DC}}{3}, -\frac{V_{DC}}{3}, -\frac{2V_{DC}}{3})$
<b>Estado</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
(S1, S2, S3)	(0,1,0)	(0,1,1)
$(V_{an}, V_{bn}, V_{cn})$	$(-\frac{V_{DC}}{3}, -\frac{2V_{DC}}{3}, -\frac{V_{DC}}{3})$	$(-\frac{2V_{DC}}{3}, \frac{V_{DC}}{3}, \frac{V_{DC}}{3})$
<b>Estado</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
(S1, S2, S3)	(0,0,1)	(1,0,1)
$(V_{an}, V_{bn}, V_{cn})$	$(-\frac{V_{DC}}{3}, -\frac{V_{DC}}{3}, \frac{2V_{DC}}{3})$	$(\frac{2V_{DC}}{3}, -\frac{2V_{DC}}{3}, \frac{V_{DC}}{3})$

En la Tabla 11 se presentan los voltajes transformados al sistema “ $\alpha\beta 0$ ” de la Tabla 10 [1].

**Tabla 11.** Voltajes en el sistema de referencia “ $\alpha\beta 0$ ”

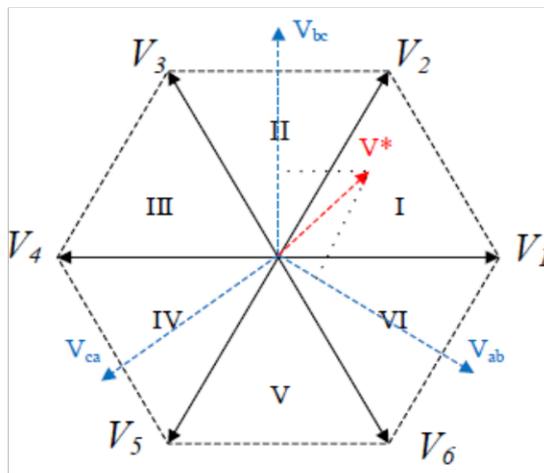
<b>Estado</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
(S1, S2, S3)	(1,0,0)	(1,1,0)	(0,1,0)
$(V_{\alpha}, V_{\beta})$	$(\frac{2V_{DC}}{3}, 0)$	$(\frac{V_{DC}}{3}, \frac{V_{DC}}{\sqrt{3}})$	$(-\frac{V_{DC}}{3}, \frac{V_{DC}}{\sqrt{3}})$
<b>Estado</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
(S1, S2, S3)	(0,1,1)	(0,0,1)	(1,0,1)
$(V_{\alpha}, V_{\beta})$	$(-\frac{2V_{DC}}{3}, 0)$	$(-\frac{V_{DC}}{3}, -\frac{V_{DC}}{\sqrt{3}})$	$(\frac{V_{DC}}{3}, -\frac{V_{DC}}{\sqrt{3}})$

Se debe realizar el mismo análisis para los demás estados activos que se realizó para conseguir en voltaje  $V_1$ , de lo que se consiguen seis voltajes en total que formarán un hexágono regular en donde su origen está en los dos vectores nulos, como se puede apreciar en la Figura 22 donde se aprecia el hexágono dividido en 6 zonas delimitadas por los vectores efectivos de voltaje de cada posible combinación de los estados activos [1].



**Figura 22.** Vectores efectivos en el plano “αβ0” [3]

Se va a obtener el voltaje sinusoidal en la salida al generar un fasor inscrito en una circunferencia dentro del hexágono. En cierto tiempo determinado el inversor requiere generar un vector  $\vec{V}^*$  que se ubicara en cualquier zona dentro del hexágono, como ejemplo se va a tomar la zona 1 la cual se encuentra delimitada por los vectores genéricos  $\vec{V}_1, \vec{V}_2$  lo que se muestra en la Figura 23 [1].



**Figura 23.** Vector referencia en el hexágono de estados activos [3]

La modulación vectorial espacial se basa en la representación de los vectores espaciales de voltaje por medio de la combinación promedio de los dos vectores en estado activo de cada sector y el vector nulo en un determinado tiempo T. Si se requiere una aproximación se la puede realizar mediante la ecuación 2.5 [1].

$$\vec{V}^* = \frac{1}{T} \sum_0^T \vec{v}_i t_i \quad (2.5)$$

Donde:

$\vec{v}_i$ : vectores promedio del vector referencia

$\vec{t}_i$ : tiempo de cada vector

T: suma de los tiempos utilizados durante el cálculo promedio, es el tiempo de los vectores de estado activo y nulo.

Además, que la modulación SVM cuenta con grados de libertad como:

- Frecuencia de muestreo
- Vector de referencia de voltaje
- Cálculos de tiempo para cada estado

## 2.4 Descripción del Emulador de Energía Eólica

La empresa Festo Didactic desarrolla sistemas de capacitación dinámicos de alta calidad que permiten entender de mejor manera las áreas técnicas, mediante el uso de módulos denominados “series LabVolt”, parte de este entorno nos permite la simulación de generación eólica mediante la implementación de diferentes módulos, conexiones y el software LVDAC-EMS, este conjunto de hardware y software permitirá simular el comportamiento del viento.

La Figura 24 muestra el equipo principal de generación eléctrica en este caso mediante energía eólica.



**Figura 24.** Sistema Festo para la simulación de generación eólica

### 2.4.1 *Dinamómetro de Cuatro Cuadrantes/Fuente de Alimentación*

Este módulo consta de un motor/generador de corriente continua de imán permanente que gira a una velocidad de 2500 r.p.m., con un rango de par magnético entre 0 a 3 N·m y una potencia de 350 W, como su nombre lo indica cuenta con una fuente de alimentación de 5 A, 150 V y una potencia que puede llegar hasta los 500 W [2] [3].

Este módulo cuenta con [3]:

- Dos salidas analógicas: la una para la velocidad y la otra para el par
- Dos entradas de termistor: permite el control de la temperatura
- Una entrada de comando analógico externo
- Dos salidas de codificador de eje
- Un interruptor que permite la selección de modo de funcionamiento
- Un botón de marcha/paro
- Un botón de funciones, el permitirá elegir las diferentes funciones
- Una perilla que permite ajustar los parámetros deseados
- Entrada USB que permite manejar el módulo desde el computador

Cuenta con dos modos de operación en los cuales se presentan distintas funciones, esto se puede ver detallado en el Anexo I.



**Figura 25.** Módulo Dinamómetro/Fuente de Alimentación de cuatro cuadrantes

Este módulo permite acoplar mediante una correa en la polea que se encuentra ubicada en el eje de la máquina otra máquina rotativa, como se muestra en la Figura 25.

### 2.4.2 Máquina de Inducción de Rotor Bobinado



**Figura 26.** Módulo de la máquina de inducción de rotor bobinado

Se puede apreciar en la Figura 26 la máquina de inducción de rotor bobinado, esta máquina es una de las que puede ser acoplada mediante una correa dentada al módulo dinamómetro/fuente de alimentación [2].

El módulo cuenta con [3]:

- Dos salidas de termistor para proteger del sobrecalentamiento a la máquina
- Protección de sobrevoltaje que detendrá la máquina si esta entra en alguna condición peligrosa

### 2.4.3 Máquina Síncronica de Imanes Permanentes

El módulo que contiene la máquina síncronica de imanes permanentes es el que se utilizará en este trabajo acoplado a la máquina del módulo dinamómetro/fuente de alimentación de cuatro cuadrantes para poder escoger la función de Emulador como Aerogenerador que es la que permitirá la generación eólica.

La máquina de imanes permanentes tiene una potencia de 260 W, sus devanados del estator se encuentran conectados en estrella, cuenta con dos salidas de termistor para detectar el sobrecalentamiento de la máquina, cuenta con un codificador para medir su velocidad y posición de la máquina montado en su eje, presenta nueve salidas de codificador que permiten generar señales en el eje que se emplean para realizar el control [2] [3].

Este módulo debe ser alimentado mediante una fuente externa de 24 V, en la Figura 27 se aprecia el módulo de la máquina síncronica de imanes permanentes [3].



**Figura 27.** Módulo de la máquina sincrónica de imanes permanentes

#### **2.4.4 Módulo IGBT Chopper/Inverter**

Este módulo está constituido por siete transistores IGBT, dentro de esto seis de los IGBTs son empleados para la implementación de los inversores, mientras que el séptimo junto con una resistencia permite la descarga cuando se da un exceso de energía en la barra DC, dicho circuito se lo activa únicamente con una pequeña palanca que se encuentra en el módulo. También se puede encontrar que los IGBTs cuenta con diferentes protecciones en caso de que pueda ocurrir: sobrecalentamiento, sobrecorrientes, cortocircuitos y sobrevoltajes. Cuenta con seis salidas de control las cuales permiten controlar las señales de conmutación, las mismas que son llevadas mediante un conector multi-pines hasta el módulo DACI. Además, cuenta con una salida de sincronización que permite observar las señales de conmutación, estas señales se presentan en pulsos de 0-5 V, al igual que el anterior módulo este debe ser alimentado mediante una fuente externa de 24 Vac [2] [3].



**Figura 28.** Módulo IGBT Chopper/Inverter

#### 2.4.5 Fuente de Alimentación



**Figura 29.** Módulo fuente de alimentación

El módulo fuente de alimentación consta de [3] :

- Una fuente de alimentación de corriente alterna trifásica de voltaje fijo
- Una fuente de alimentación de corriente continua de voltaje fijo

Cada una de estas fuentes se las maniobras mediante interruptores separados, presentan luces que indican la presencia de voltaje en cada fase, además que es el módulo que permitirá en ingreso de emulador de energía eólica con la red de la EEQ.

#### 2.4.6 Carga Resistiva

Este módulo contiene nueve resistencias de potencia, las cuales están distribuidas en tres bancos similares. Cada uno de estos bancos tiene tres resistencias en conexión paralelo con los siguientes valores 300/600/1200  $\Omega$  por grupo, se puede realizar diferentes combinaciones gracias a que cuenta con un interruptor por cada resistencia lo que se muestra en la Figura 30 [3] [2]. Las especificaciones que del fabricante se las encuentra en los Anexos.



**Figura 30.** Módulo de carga resistiva

#### **2.4.7 Módulo del Transformador**

El módulo del transformador presenta una característica de 200 VA trifásicos y una relación de 120V/83V a una frecuencia de 60 Hz, este módulo permite reducir el voltaje de la red que ingresa al inversor [3].

#### **2.4.8 Interfaz de Adquisición y Control de Datos**

El módulo de la Interfaz de adquisición y control de datos (por sus siglas en inglés DACI) contiene instrumentos y funciones de control que permiten al usuario visualizar, medir y analizar los parámetros eléctricos. El software LVDAC-EMS es un multímetro que permite tomar medidas de corriente, voltaje, potencias, factor de potencia, rendimiento, velocidad, torque, frecuencia, etc., cuenta con un osciloscopio en el cual se permite observar hasta ocho señales en simultáneo, incluye también funciones como analizador de fasores, analizador de armónicos y una tabla la cual permite tomar las muestras que se requieran de las mediciones que se estén tomando [1] [2].

Las especificaciones del fabricante acerca de la interfaz de adquisición y control de datos se encuentran en la sección de Anexos.

Para el caso del emulador de energía eólica se cuenta con dos módulos de adquisición y control de datos, cada uno cuenta con cuatro multímetros de hasta 800 V, cuatro amperímetros con dos escales una de 4 A y la otra de 40 A, una entrada de codificador digital, ocho entradas analógicas, dos salidas digitales y un multi-pines que permite conectarse a los IGBTs para la conmutación. EL módulo necesita de una fuente de alimentación externa de 24 Vac y además cuenta con una entrada USB para conectarse a la computadora, estos se pueden apreciar en la Figura 31, mientras que en la Figura 32 se presenta al interfaz de software LVDAC-EMS [1] [3].



**Figura 31.** Módulo DACI

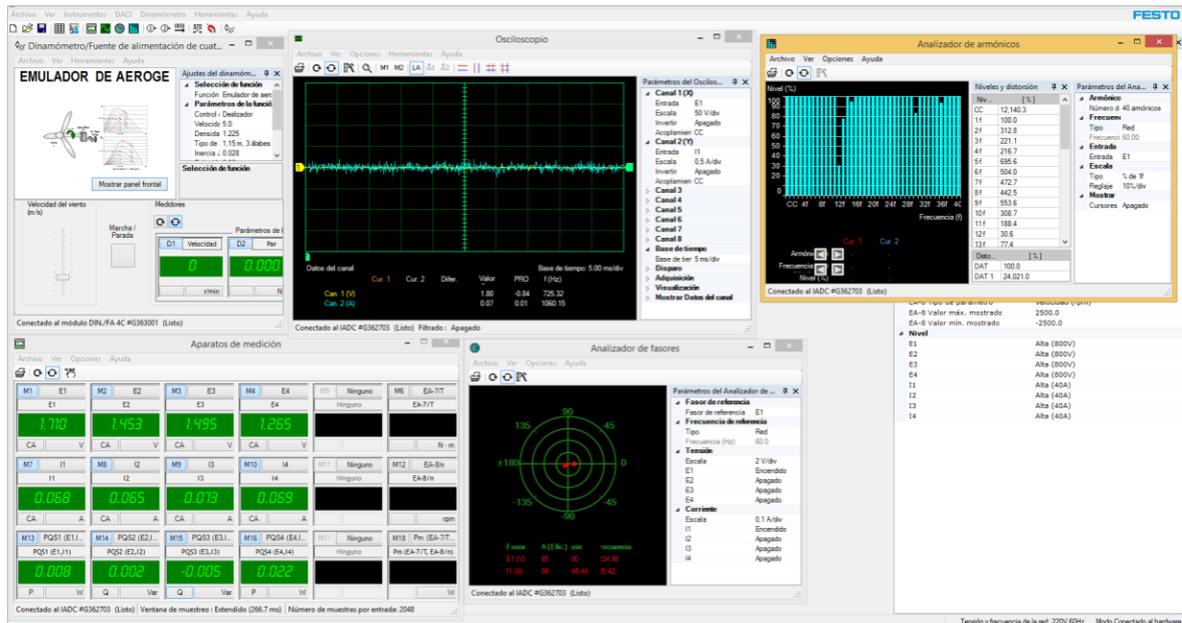


Figura 32. Interfaz del software LVDAC-EMS

## 2.4.9 Inductores de Línea

Existe un módulo que consta de tres inductores separados que pueden conectarse en serie en un circuito trifásico [3].

## 2.4.10 Software o Programa LVDA-EMS

Este tipo de software es gratuito y es descargable en cualquier momento de la plataforma de Festo Didactic. El LVDA-EMS es un programa sencillo de manejar el cual facilita el uso de las diversas funciones presentes en los módulos disponibles para conexión al computador como son la Interfaz de Adquisición y Control de Datos (DACI) y el Dinamómetro de Cuatro Cuadrantes/Fuente de Alimentación [2].

Este software es el que permite el control y simulación del Emulador de Generación Eólica, para esto será necesario en el software abrir la pestaña Dinamómetro de Cuatro Cuadrantes/Fuente de Alimentación, en la sección de función se debe elegir Emulador de Aerogenerador, mientras que en la sección de Parámetros de función se establecerá en la Tabla 12.

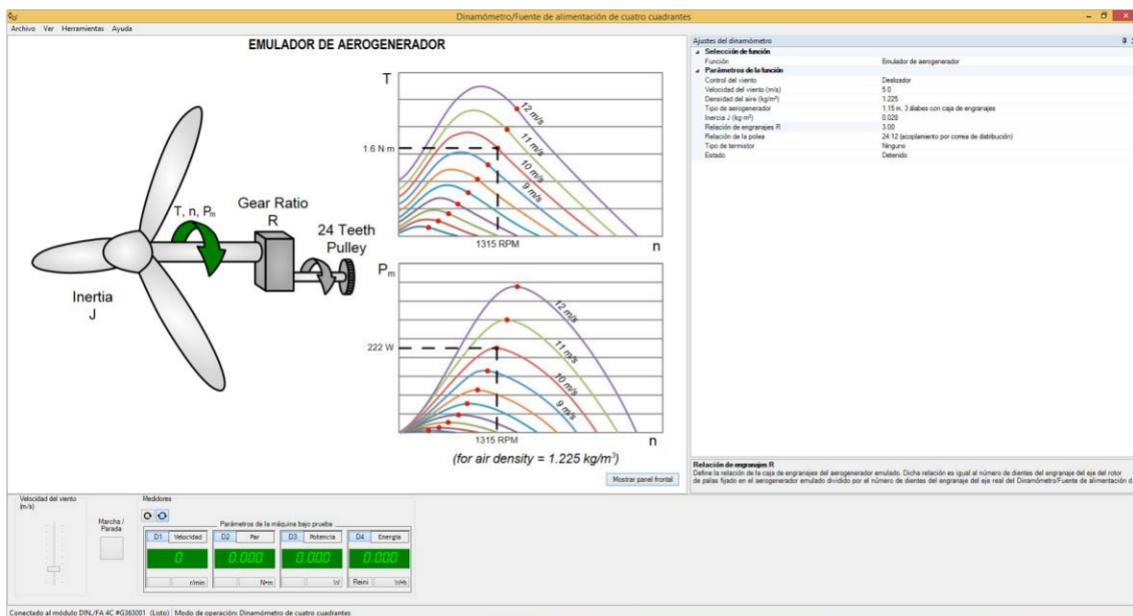
**Tabla 12.** Parámetros del Emulador de Aerogenerador

Control del viento	Deslizador
Velocidad del viento (m/s)	5,0
Densidad del aire ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	1,225
Tipo de aerogenerador	1,5 m. 3 álabes con caja de engranajes
Inercia J ( $\text{kg}.\text{m}^2$ )	0,028
Relación de engranajes R	3,00
Relación de la polea	24:12 (acoplamiento por correa de distribución)
Tipo de termistor	Tipo LV 3
Estado	Detenido

Además, que en la Figura 33 se puede apreciar una imagen de la interfaz del emulador de aerogenerador.

El valor de densidad del aire que se establece en los parámetros de la función es de  $1.255 \text{ kg}/\text{m}^3$  que se presenta bajo condiciones estándar a nivel del mar, las cuales son: temperatura de  $15.5^\circ\text{C}$ , una presión atmosférica de  $101.325 \text{ kPa}$  y una humedad relativa de  $36\%$  [3].

La relación de engranajes y la relación de la polea se establecen en  $3.00$  y  $24:12$  respectivamente, esto debido a que con estos valores se puede alcanzar la velocidad de  $6000 \text{ r.p.m.}$  [3].



**Figura 33.** Interfaz de la función del emulador de aerogenerador

Otra interfaz importante para el funcionamiento del emulador de energía eólica viene hacer la elección de la interfaz de control de motor BLDC/PMSM que es la cual permitirá activar el seguidor de MPPT del lado del generador y el lazo de enclavamiento PLL del lado de la red, los parámetros son los que ya vienen predeterminados. En la misma interfaz se puede apreciar las conexiones necesarias para que el Módulo Festo funcione como Emulador de Energía Eólica, así mismo la conexión que permite que el Aerogenerador con PMSG se conecte a la red eléctrica.

En la Figura 34 se muestra la interfaz de control de motor BLDC/PMSM, mientras que en la Figura 35 se puede apreciar en control que se realiza para el MPPT y en la Figura 36 se muestra el diagrama de control del PLL.

Y por último se puede apreciar en la Figura 37 las conexiones necesarias y los módulos que se necesitan para simular el Emulador de Energía Eólica.

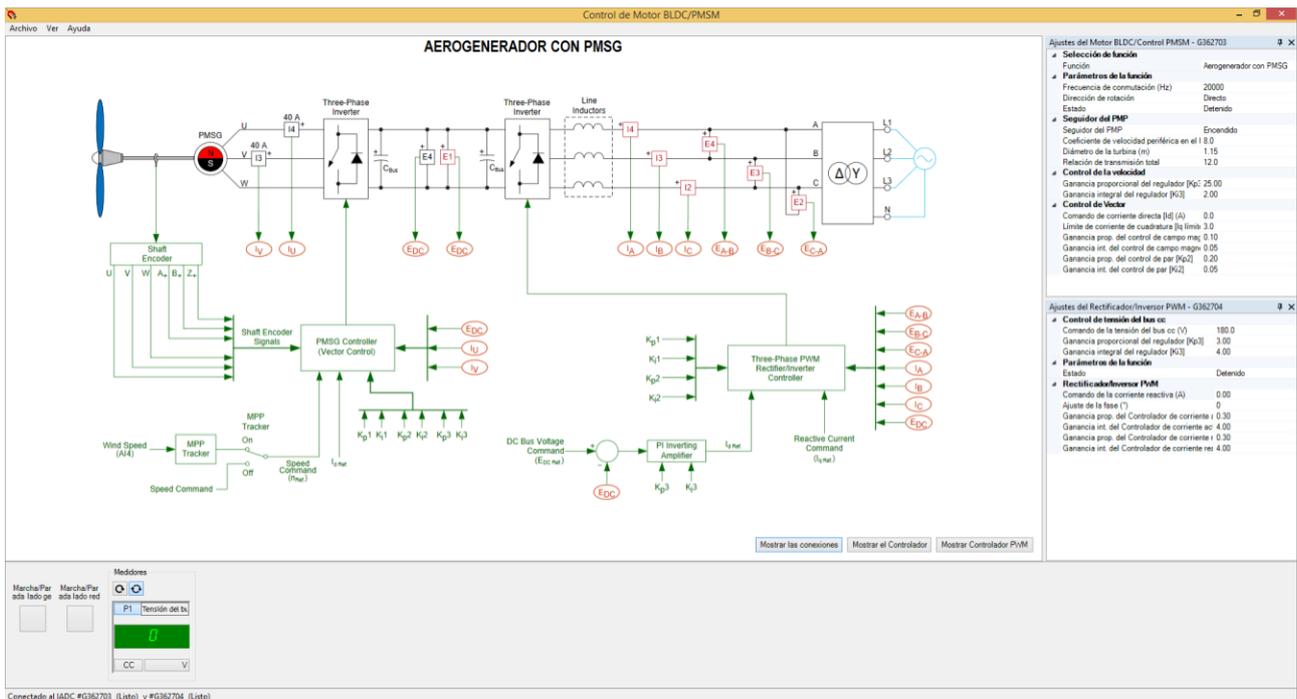


Figura 34. Interfaz del control de motor BLDC/PMSM

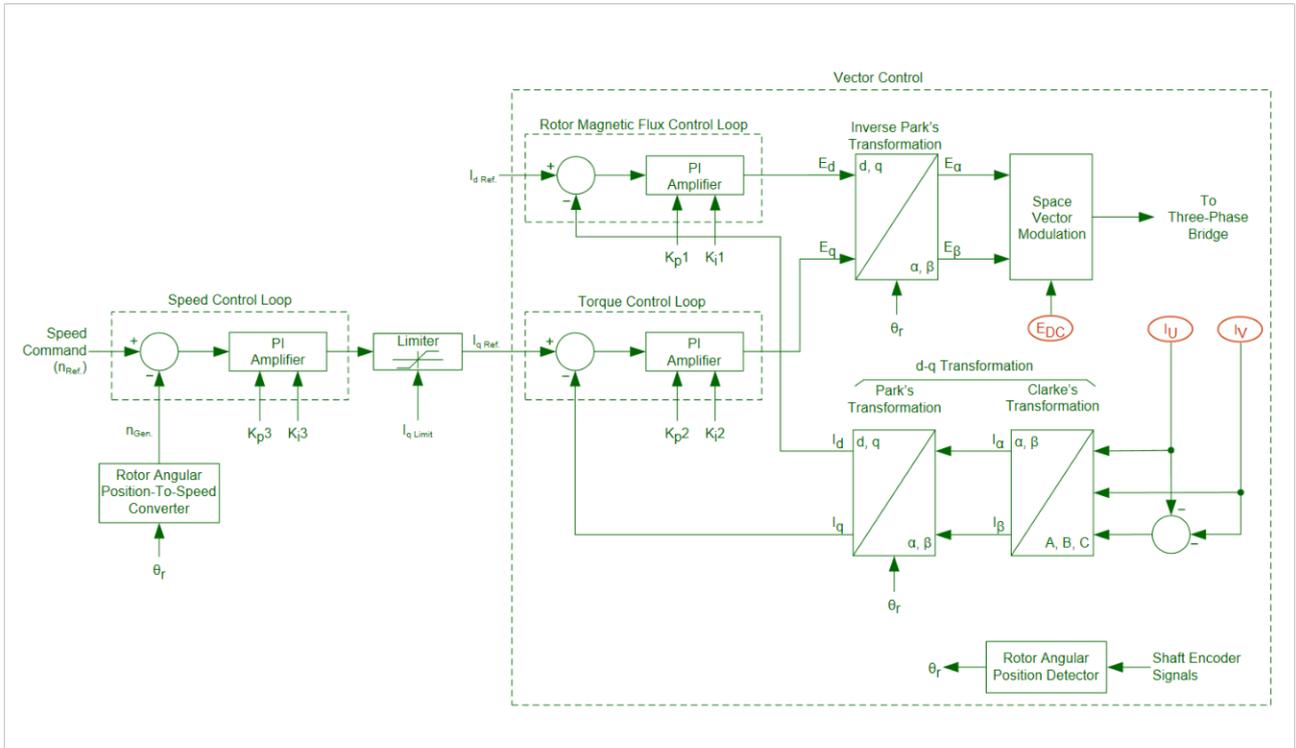


Figura 35. Diagrama de bloque del control del MPPT [3]

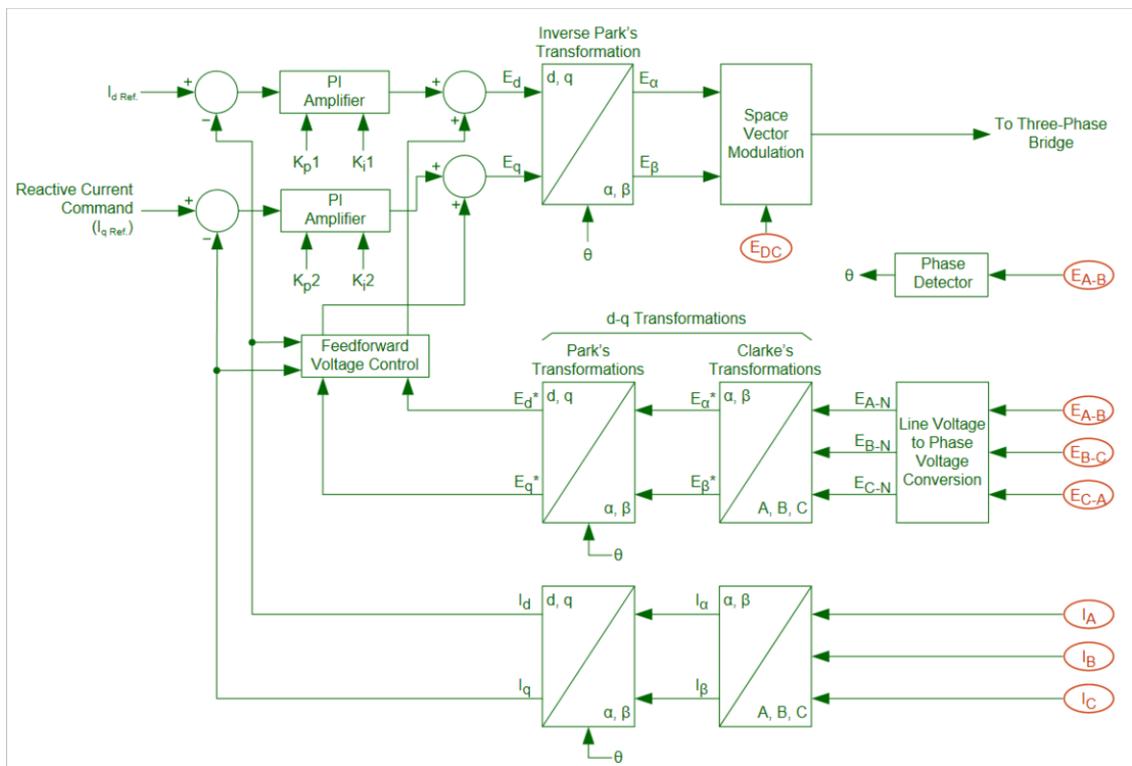


Figura 36. Diagrama de bloque de lazo de enclavamiento de fase PLL [3]

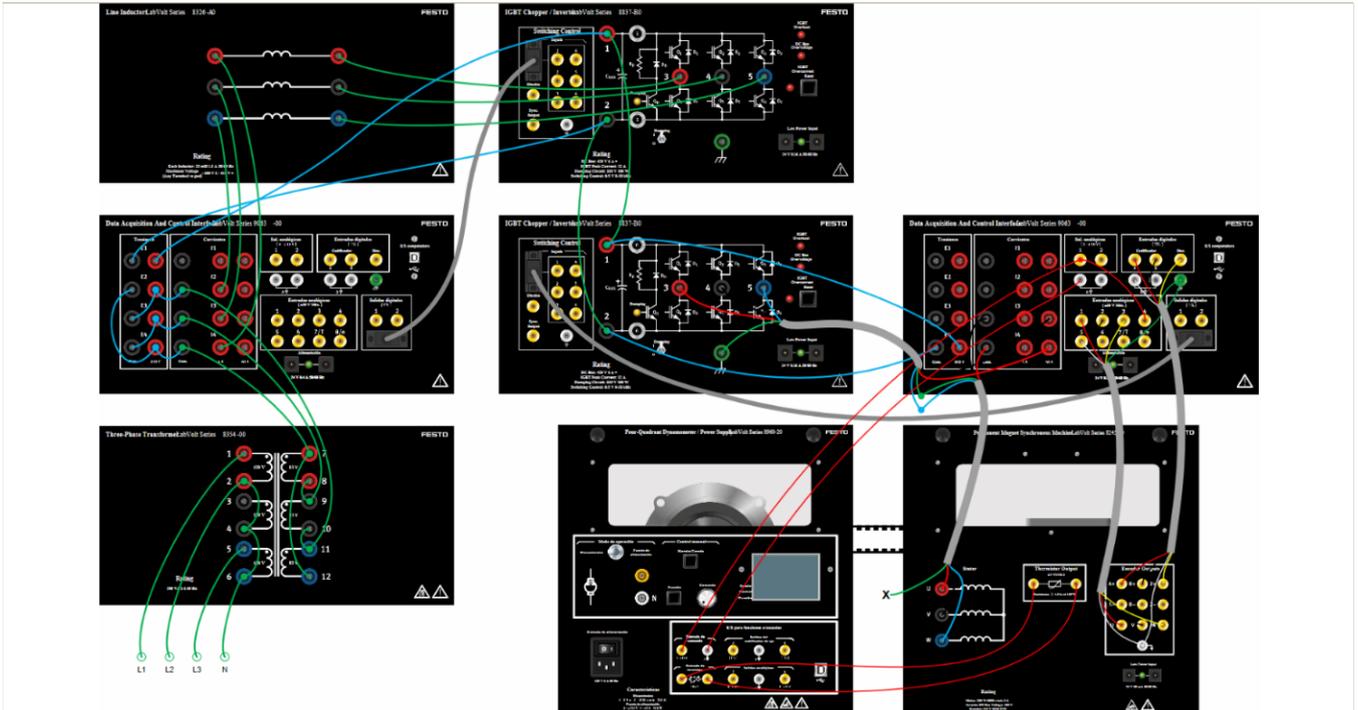


Figura 37. Diagrama de conexiones del Emulador de Energía Eólica [3]

### 3 PRUEBAS, RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 3.1 Pruebas y Resultados

##### 3.1.1 Pruebas en la PMSG

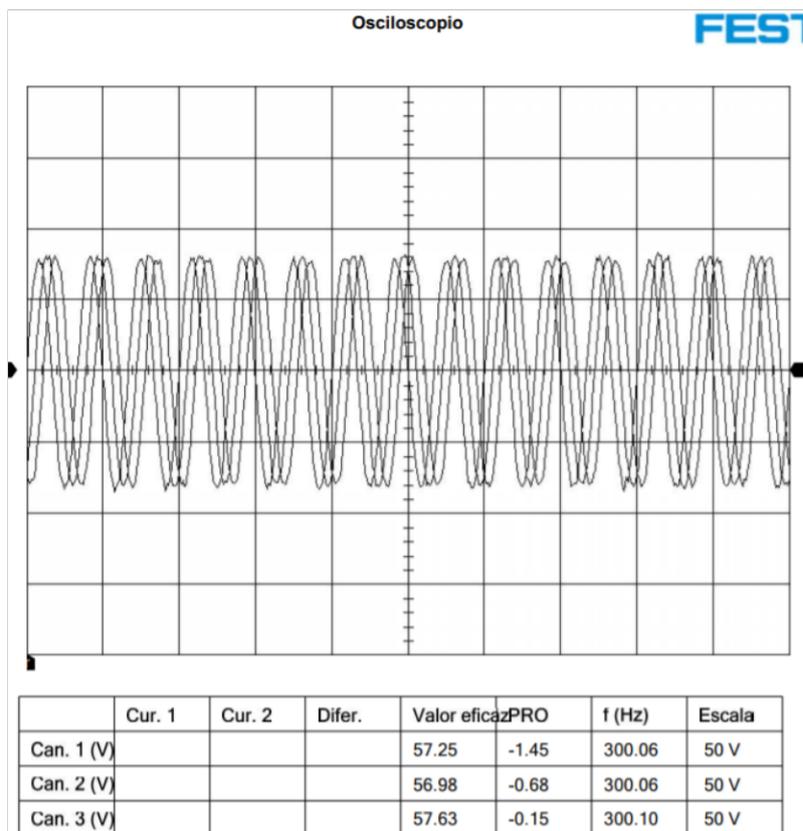
Se realiza en primer lugar la comprobación del funcionamiento del emulador de energía eólica de forma correcta sin estar conectado a la red de la EEQ.

La primera prueba en realizar fue la de la PMSG en vacío para comprobar sus voltajes en las fases del estator (U, V, W) se realizó la prueba para un rango de velocidades de viento de la turbina de 3 a 12 m/s de donde se pudo apreciar que la PMSG llega a su velocidad nominal de 6000 r.p.m. cuando la velocidad del viento es de 10 m/s con un voltaje de fases de 57,5 V para el voltaje  $V_{wu}$  y un torque de -0,04 N·m lo que se puede apreciar en la Tabla 13.

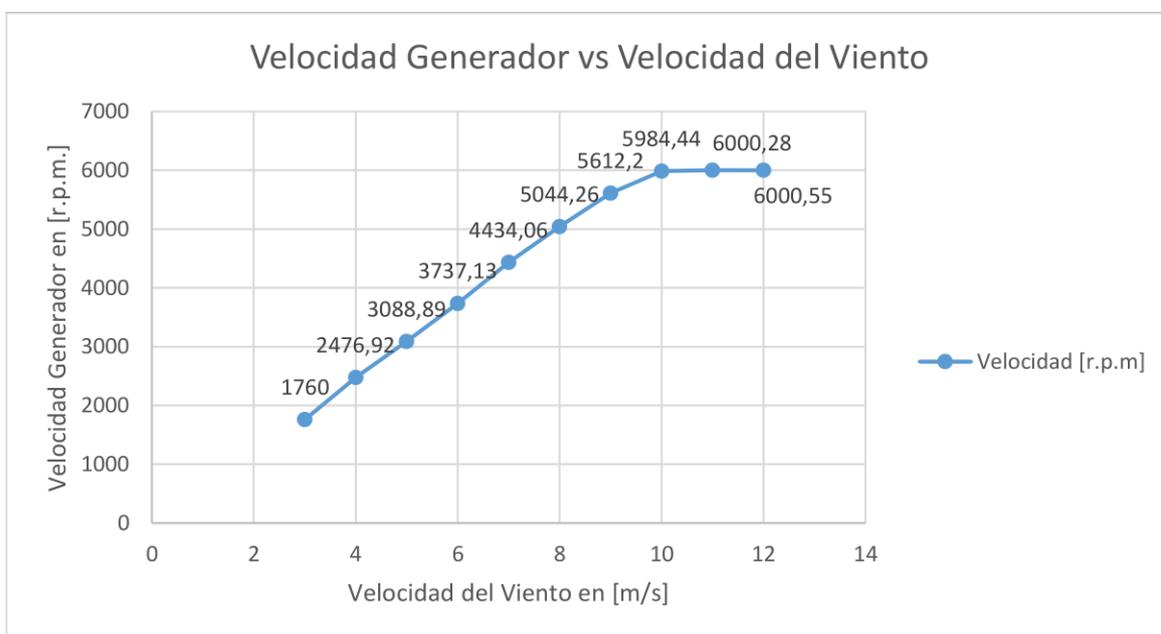
**Tabla 13.** Valores de velocidad, par, voltaje de fases para la PMSG en vacío

Velocidad Viento [m/s]	Velocidad [r.p.m]	Par [N.m]	Voltaje $V_{uv}$ [V]	Voltaje $V_{vw}$ [V]	Voltaje $V_{wu}$ [V]
3	1760	0	17,81	17,57	18,01
4	2476,92	-0,0019	23,91	23,66	24,14
5	3088,89	-0,003	30	29,76	30,27
6	3737,13	0,004	35,81	35,58	36,08
7	4434,06	0,007	42,34	42,1	42,66
8	5044,26	0,007	48,1	47,89	48,46
9	5612,2	-0,01	53,79	53,55	54,17
10	6000,01	-0,004	57,1	56,89	57,5
11	6000,28	0,007	57,02	56,83	57,43
12	6000,55	0,009	57,5	56,96	57,3

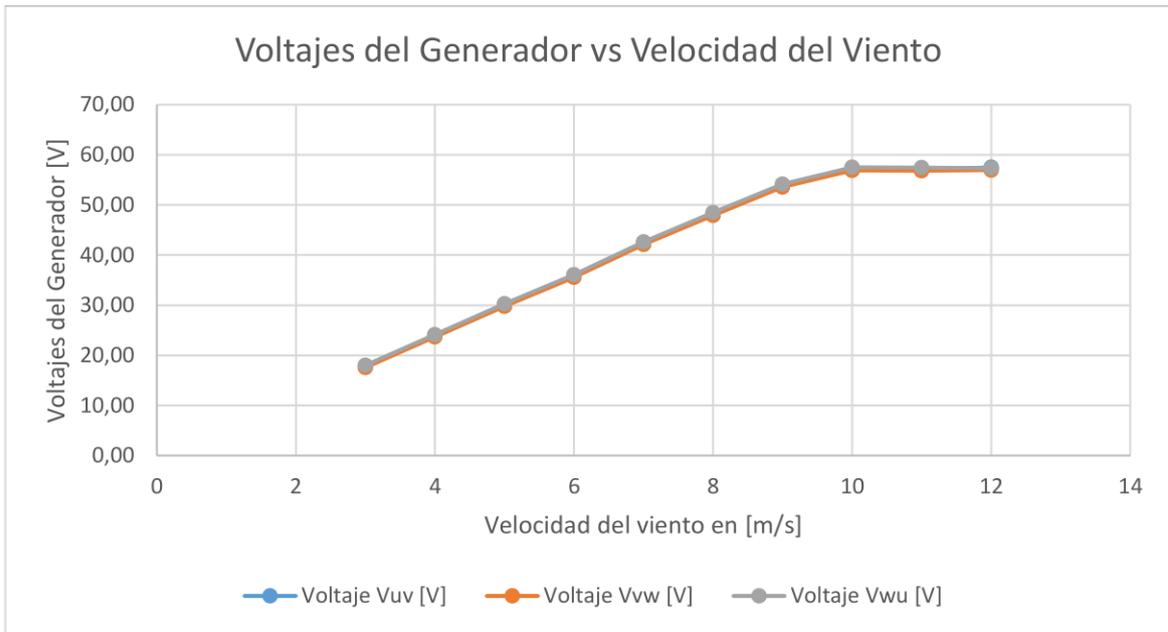
Se obtienen las gráficas de los voltajes de fase  $V_{uv}$ ,  $V_{vw}$  y  $V_{wu}$  para una velocidad del viento de 12 m/s, a una velocidad del generador de 6000 r.p.m., también se puede apreciar la frecuencia a la que trabaja la PMSG que en este caso es de 300 Hz lo que se muestra en la Figura 38.



**Figura 38.** Voltaje de fase de la PMSG



**Figura 39.** Velocidad del generador vs velocidad del viento



**Figura 40.** Voltajes del generador vs velocidad del viento

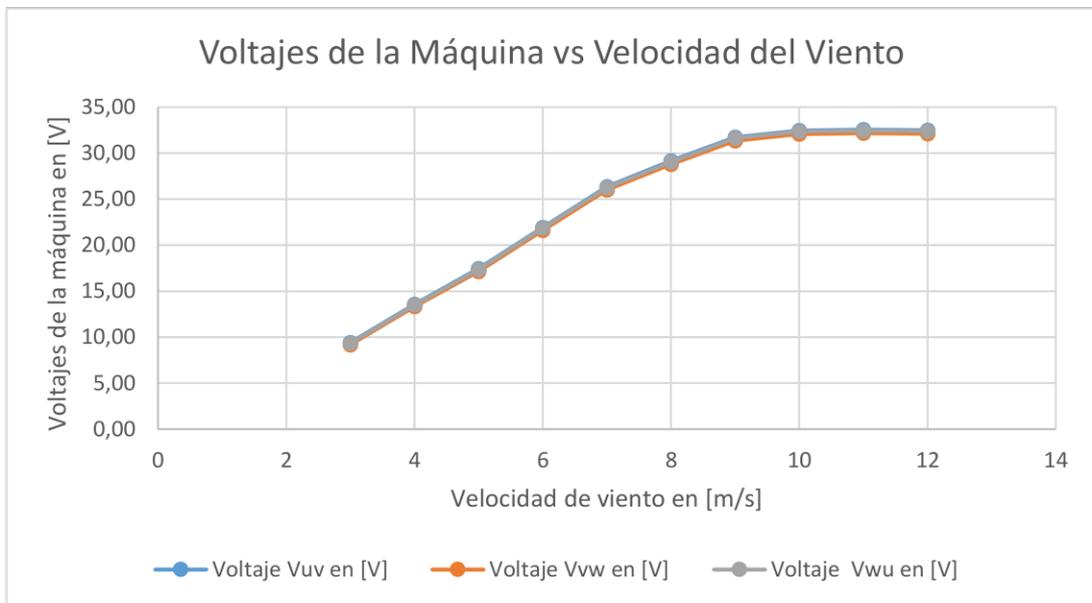
En las gráficas de las Figuras 39 y 40 se puede apreciar la velocidad del viento vs los voltajes de las fases y velocidad del viento. Se obtuvieron gráficas de los armónicos que se pueden apreciar en la sección de Anexos, en las gráficas se observa una serie de armónicos elevados debido a que se tomó como referencia una frecuencia de 60 Hz y como se explicó el Emulador trabaja a una frecuencia de 300 Hz.

A continuación, se realizaron pruebas de la PMSG con carga resistiva de 300-600-1200  $\Omega$  de donde se obtuvieron valores de voltaje, corriente y potencia para las diferentes velocidades de viento. De donde se obtuvieron los siguientes resultados:

Para una resistencia de 300  $\Omega$  por cada par de resistencia se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 14 de lo que se aprecia como al incluir carga el voltaje a la velocidad nominal es 32,49 V, corriente de 0,22 A, potencia monofásica de 6,91 W, potencia trifásica de 20,73 W y una frecuencia de 300 Hz. Además, que la gráfica de la Figura 41 muestra el progreso de la velocidad del viento con respecto a los voltajes de fase.

**Tabla 14.** Valores de la PMSG con resistencia de 300Ω

Velocidad del Viento [m/s]	Voltaje Vuv [V]	Voltaje Vvw [V]	Voltaje Vwu [V]	Frecuencia del Aerogenerador [Hz]	Iu [A]	Iv [A]	Iw [A]	Potencia A 300Ω [W]	Potencia B 300Ω [W]	Potencia C 300Ω [W]	Velocidad [r.p.m.]
3	9,41	9,18	9,33	83,05	0,10	0,11	0,10	0,74	0,72	0,64	1650,08
4	13,58	13,31	13,49	121,01	0,12	0,13	0,12	1,41	1,37	1,27	2428,34
5	17,44	17,13	17,34	157,27	0,14	0,14	0,14	2,19	2,15	2,03	3154,18
6	21,92	21,61	21,85	199,16	0,17	0,17	0,16	3,34	3,28	3,14	3960,63
7	26,34	26,00	26,24	240,83	0,19	0,19	0,18	4,71	4,64	4,47	4704,04
8	29,16	28,78	29,03	266,10	0,20	0,21	0,20	5,65	5,58	5,39	5379,43
9	31,72	31,34	31,61	291,33	0,22	0,22	0,21	6,60	6,52	6,34	5827,15
10	32,46	32,08	32,35	298,73	0,22	0,22	0,22	6,89	6,81	6,62	5973,15
11	32,54	32,16	32,42	300,03	0,22	0,22	0,22	6,93	6,83	6,66	6000,16
12	32,49	32,11	32,39	300,06	0,22	0,22	0,22	6,91	6,82	6,64	6000,57

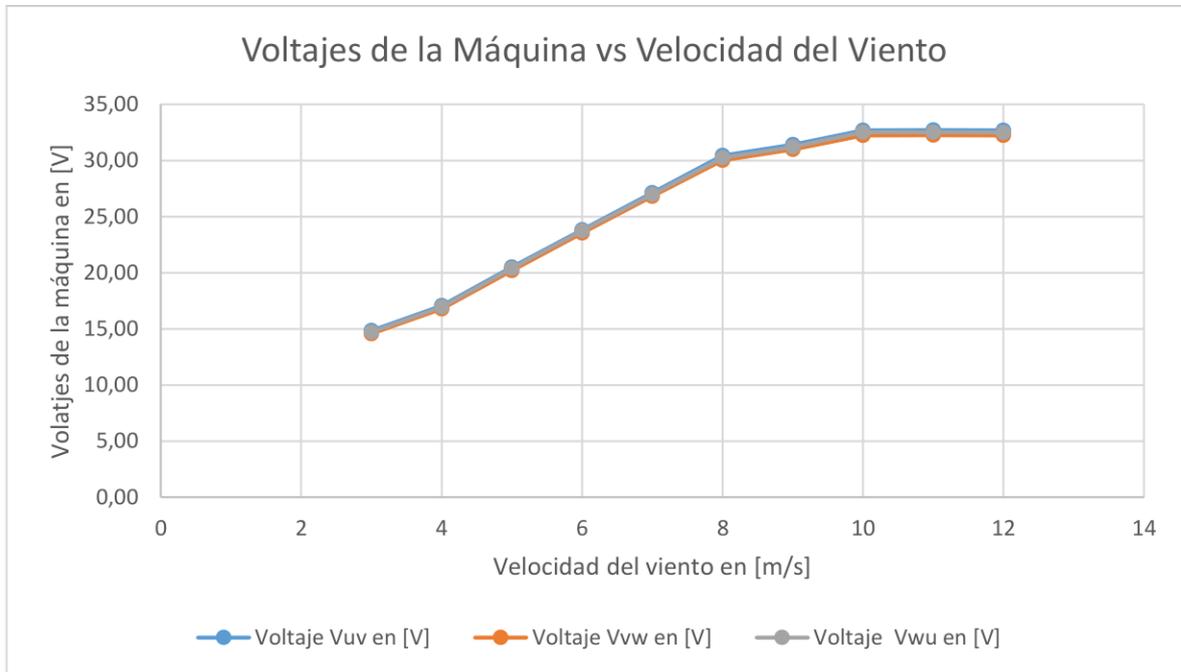


**Figura 41.** Voltajes de la máquina vs velocidad del viento para 300Ω

Para una resistencia de 600 Ω por cada para de resistencia se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 15 de lo que se aprecia como al incluir carga el voltaje a la velocidad nominal es 32,49 V, corriente de 0,12 A, potencia monofásica de 3,34 W, potencia trifásica de 10,02 W y una frecuencia de 300 Hz. Además, que la gráfica de la Figura 42 muestra el progreso de la velocidad del viento con respecto a los voltajes de fase.

**Tabla 15.** Valores de la PMSG con resistencia de  $600\Omega$

Velocidad del Viento [m/s]	Voltaje Vuv [V]	Voltaje Vvw [V]	Voltaje Vwu [V]	Frecuencia del Aerogenerador [Hz]	Iu [A]	Iv [A]	Iw [A]	Potencia A $600\Omega$ [W]	Potencia B $600\Omega$ [W]	Potencia C $600\Omega$ [W]	Velocidad [r.p.m.]
3	14,83	14,57	14,71	134,90	0,09	0,09	0,09	0,90	0,87	0,76	2690,75
4	17,06	16,77	16,93	154,99	0,09	0,10	0,09	1,12	1,09	0,97	3092,12
5	20,50	20,19	20,40	186,10	0,10	0,10	0,10	1,53	1,49	1,35	3766,77
6	23,82	23,54	23,73	217,42	0,11	0,11	0,10	2,02	1,98	1,81	4360,97
7	27,11	26,80	26,99	248,04	0,11	0,12	0,11	2,48	2,42	2,23	4955,60
8	30,43	30,02	30,26	277,57	0,12	0,12	0,11	2,97	2,90	2,70	5591,60
9	31,40	30,98	31,22	287,67	0,12	0,12	0,12	3,14	3,06	2,87	5730,93
10	32,69	32,24	32,50	299,45	0,12	0,13	0,12	3,35	3,29	3,08	5989,72
11	32,71	32,25	32,52	300,04	0,12	0,13	0,12	3,36	3,29	3,08	6000,46
12	32,68	32,23	32,49	300,03	0,12	0,13	0,12	3,34	3,30	3,07	6000,26



**Figura 42.** Voltajes de la máquina vs velocidad del viento 600Ω

Para una resistencia de 1200 Ω por cada para de resistencia se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 16 de lo que se aprecia como al incluir carga el voltaje a la velocidad nominal es 32,92 V, corriente de 0,09 A, potencia monofásica de 1,62 W, potencia trifásica de 4,86 W y una frecuencia de 300 Hz.

**Tabla 16.** Valores de la PMSG con resistencia de  $1200\Omega$

Velocidad del Viento [m/s]	Voltaje Vuv [V]	Voltaje Vvw [V]	Voltaje Vwu [V]	Frecuencia del Aerogenerador [Hz]	Iu [A]	Iv [A]	Iw [A]	Potencia A $1200\Omega$ [W]	Potencia B $1200\Omega$ [W]	Potencia C $1200\Omega$ [W]	Velocidad [r.p.m.]
3	12,72	12,34	12,67	113,01	0,08	0,08	0,07	0,44	0,42	0,33	2260,77
4	15,50	15,08	15,48	138,39	0,08	0,08	0,07	0,57	0,55	0,43	2764,55
5	18,85	18,35	18,81	168,94	0,08	0,08	0,08	0,73	0,71	0,58	3362,12
6	21,44	20,87	21,41	192,44	0,08	0,08	0,08	0,87	0,84	0,70	3843,35
7	24,92	24,29	24,89	224,20	0,08	0,08	0,08	1,08	1,05	0,87	4471,94
8	29,46	28,74	29,46	267,14	0,08	0,09	0,08	1,38	1,33	1,13	5350,99
9	31,97	31,18	31,98	289,89	0,08	0,09	0,08	1,55	1,51	1,30	5798,22
10	32,96	32,16	32,94	299,62	0,08	0,09	0,08	1,62	1,57	1,35	5992,63
11	32,96	32,14	32,96	300,03	0,08	0,09	0,08	1,63	1,56	1,36	6000,20
12	32,92	32,11	32,92	300,04	0,08	0,09	0,08	1,62	1,56	1,36	6000,02

Se aprecia en las Tablas anteriores si la resistencia aumenta la potencia monofásica disminuye por ende la potencia trifásica también disminuye, por lo que para una resistencia de  $300\Omega$  se tiene una potencia de monofásica de 6.91 W y potencia trifásica de 20,73 W, mientras que para una resistencia de  $1200\Omega$  se tiene una potencia monofásica de 1,62 W y potencia trifásica de 4,86 W, de lo que se puede considerar que el Emulador de Energía Eólica funciona de forma correcta, hay que recalcar que no se conectó el convertidor AC-DC-DC-AC.

### 3.1.2 Pruebas del Aerogenerador con PMSG

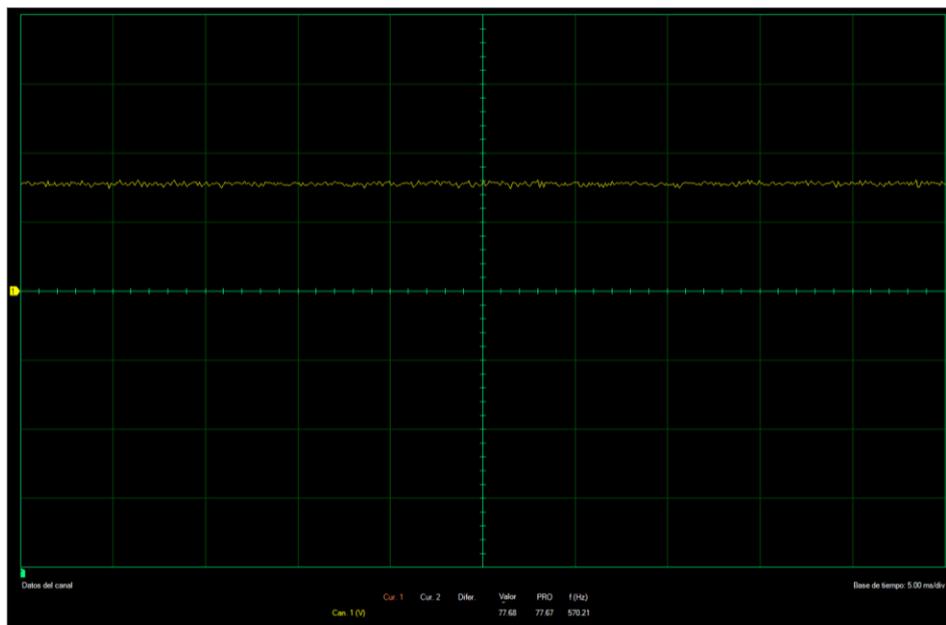
Se realizó la prueba del aerogenerador con PMSG es decir ya con la conexión del rectificador del lado del generador y del inversor del lado de la red sin conectar la red eléctrica de la EEQ por lo que se tomaron valores de voltaje de las fases del generador, la velocidad del generador, el par electromagnético, el valor de voltaje de la Barra DC en el rectificador como en el inversor lo que se muestra en la Tabla 17.

**Tabla 17.** Parámetros del aerogenerador con PMSG y voltaje de la Barra DC

Velocidad del viento [m/s]	Velocidad de la Máquina [r.p.m.]	Torque en [N.m]	Potencia de la Máquina [W]	Energía de la Máquina [W*h]	Voltaje de la Barra DC [V]
3,0	2042	0,012	2,523	0,028	26,46
3,5	2360	0,017	4,263	0,363	30,21
4,0	2676	0,014	4,049	0,520	34,22
4.5	2964	0,020	6,347	0,671	39,05
5,0	3270	0,021	7,345	0,932	43,73
5,5	3574	0,028	10,65	1,176	50,18
6,0	3886	0,031	12,76	1,539	53,59
6,5	4212	0,034	15,17	1,770	56,28
7,0	4586	0,036	17,14	2,130	60,46
7,5	4976	0,046	23,84	2,818	65,42
8,0	5396	0,053	30,20	3,127	68,49
8,5	5432	0,055	31,37	4,418	73,18
9,0	5606	0,058	34,23	6,164	76,41

9,5	5906	0,042	25,82	7,152	77,45
10,0	5598	0,031	19,22	7,470	77,65
10,5	6000	0,037	23,15	7,837	77,65
11,0	6000	0,039	24,46	8,298	77,67
11,5	6000	0,039	24,65	8,818	77,67
12,0	6000	0,040	25,08	9,081	77,67

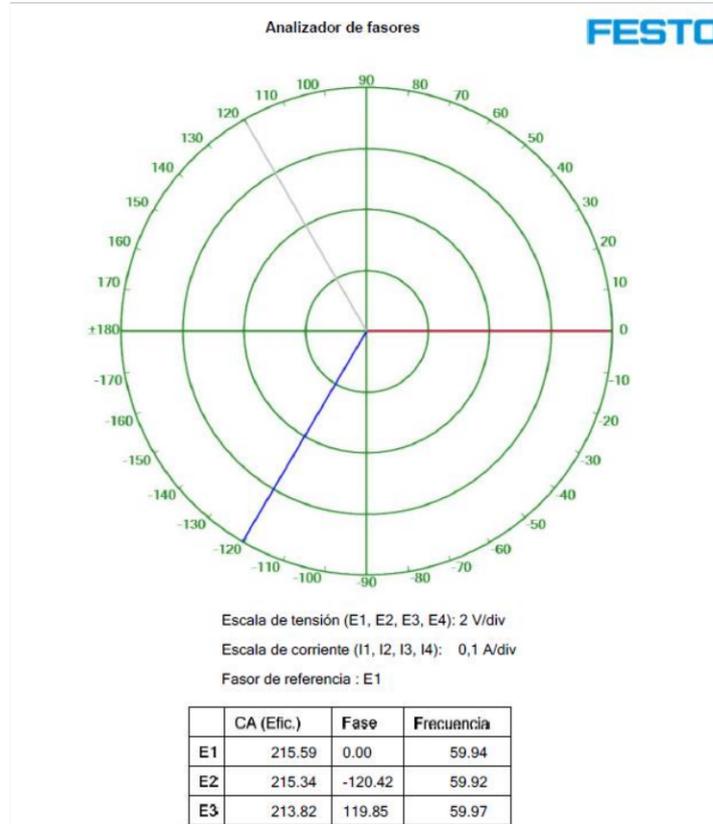
Además, que en la Figura 43 se presenta la gráfica del voltaje de la Barra DC tomado del osciloscopio del software LVDA-EMS.



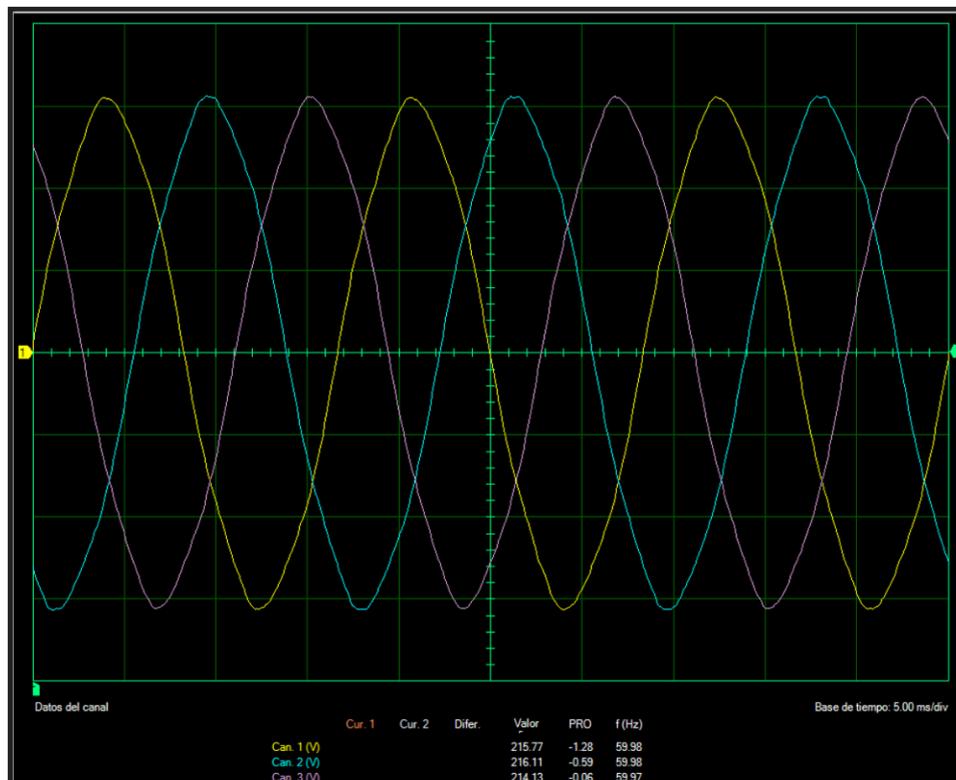
**Figura 43.** Voltaje de la Barra DC del Emulador de Energía Eólica

Antes de ingresar la red de la EEQ con el emulador se tomaron datos de voltaje y desfaseamiento que la red brinda, de donde se obtuvo que la  $V_{ab}$  es de 215,59 V y una fase de  $0^\circ$  a una frecuencia de 59,94 Hz,  $V_{bc}$  es de 215,34 V y una fase de  $-120,42^\circ$  a una frecuencia de 59,92 Hz y para el  $V_{ca}$  es de 213,82 V y una fase de  $119,85^\circ$  a una frecuencia de 59,97 Hz.

Esto se puede apreciar en la Figura 44 donde se presenta el diagrama fasorial de los voltajes de fase y en la Figura 45 las formas de onda de voltajes de fase de la red de la EEQ. En la sección de Anexos se puede apreciar la gráfica de los armónicos de voltaje generados.



**Figura 44.** Diagrama fasorial de los voltajes de fase de la EEQ

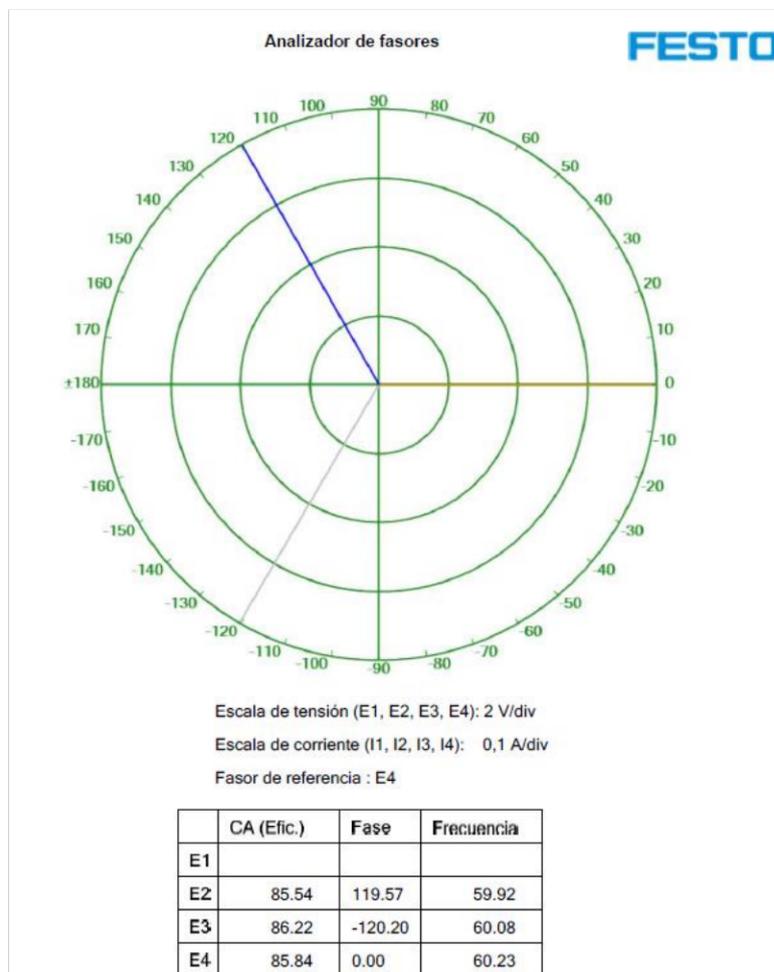


**Figura 45.** Formas de onda de los voltajes de fase de la red de la EEQ

Se toman datos del voltaje de fases y voltaje de la barra DC en lado delta del transformador, así como diagramas fasoriales y de ondas de voltaje mostrados en la Figuras 46 y 47 respectivamente, para poder apreciar cuales son las señales que se tomarán para la activación del PLL.

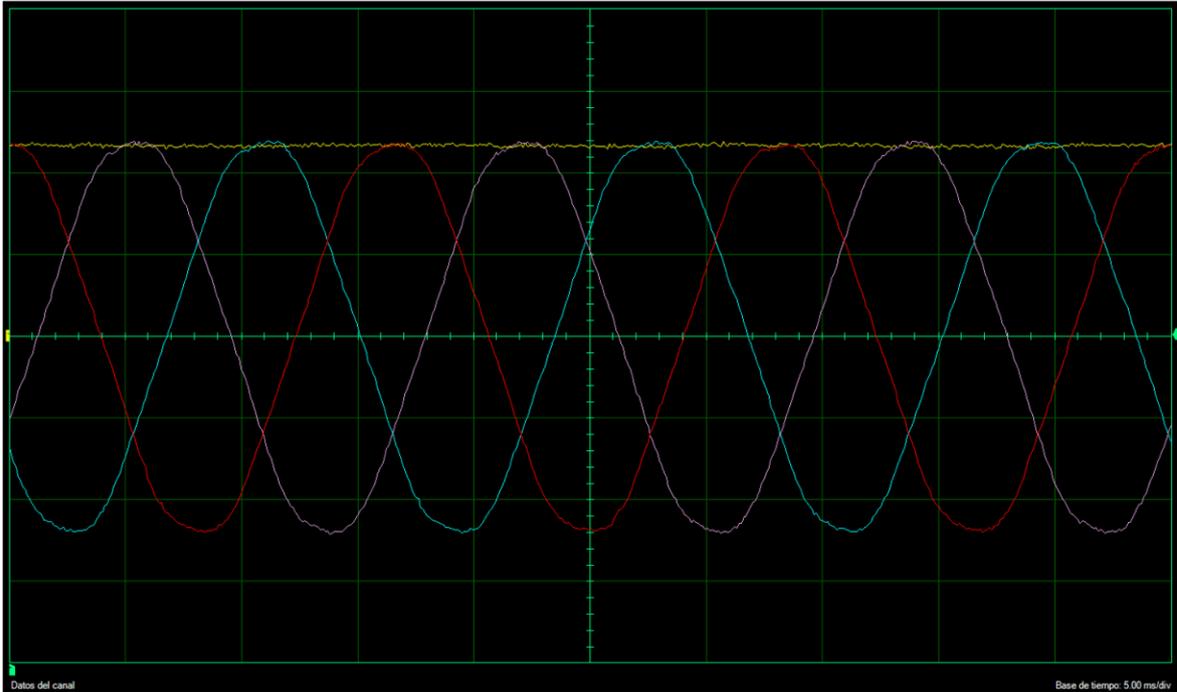
**Tabla 18.** Valores de voltaje de fases en el lado delta del transformador

$V_{ab}$ en [V]	$V_{bc}$ en [V]	$V_{ca}$ en [V]	Voltaje Barra DC en [V]
85.48	85.79	85.27	116.55



**Figura 46.** Diagrama fasorial de voltajes de fase en el lado delta del transformador

Se toma como referencia el E4 que se aprecia en la gráfica de la Figura 46 debido a que se conecta en esa sección el multímetro que media el  $V_{ab}$ .



**Figura 47.** Ondas de voltaje de fase en el lado delta del generador y grafica de voltaje de la Barra DC

Como se puede apreciar en la graficas anteriores se ve reducido el voltaje de las fases de la red de la EEQ que van a ingresar al control del PLL, además se puede notar el cambio en el voltaje de la Barra DC que antes si la red era de 77,68 V y ahora aumento a 116,55 V que también es una señal de entrada para el control del PLL.

Con el Emulador de Energía Eólica conectado en paralelo con la red de la EEQ se tomaron datos de voltaje en las fases  $V_{ab}$  y  $V_{cb}$ , voltaje en la Barra DC, corrientes en  $I_a$  e  $I_c$ , potencias trifásicas activa, reactiva y aparente, potencia del generador, todo esto para diferentes velocidades del viento y velocidades del generador.

**Tabla 19.** Datos del Emulador de Energía Eólica conectado a la red de la EEQ

Velocidad del Viento [m/s]	Voltaje Vab [V]	Voltaje Vbc [V]	Voltaje de la Barra DC [V]	Ia [A]	Ic [A]	Potencia Activa 3φ [W]	Potencia Reactiva 3φ [VAr]	Potencia Aparente 3φ [VA]	Velocidad del Generador [r.p.m.]	Potencia del Generador [W]
3	212,703	213,776	117,049	0,171	0,211	23,639	-16,213	28,700	2394,257	3,286
4	212,678	214,226	117,178	0,175	0,208	20,972	-13,948	25,203	2981,307	4,035
5	212,673	213,964	117,175	0,172	0,213	21,275	-16,147	26,793	3623,584	4,515
6	212,625	213,948	117,088	0,170	0,219	20,178	-18,008	27,115	4259,624	4,059
7	212,498	213,994	117,074	0,178	0,213	17,001	-13,550	21,699	4919,089	5,442
8	212,435	214,095	117,180	0,175	0,218	19,380	-16,601	25,572	5543,743	8,248
9	212,358	213,810	117,022	0,179	0,212	17,890	-13,678	22,527	5850,614	10,208
10	212,566	213,880	116,982	0,177	0,213	17,460	-14,229	22,552	5993,109	9,561
11	212,570	213,867	117,107	0,176	0,213	18,537	-14,836	23,768	6000,376	10,656
12	212,422	213,755	117,043	0,178	0,210	19,544	-13,437	23,790	6000,257	11,338

En la Tabla 19 se puede apreciar los valores de voltaje de la fase  $V_{ab}$  y  $V_{cb}$  de donde se aprecia una disminución del voltaje a 212,7 V y 213,88 V respectivamente al contrario de cuando el emulador no estaba conectado a la red donde el valor de voltaje era de 215 V, se observa que con el ingreso de la red EEQ en paralelo el voltaje de la Barra DC a medida que la velocidad del viento aumentaba no sufrió una variación importante y su valor era de aproximadamente 117,2 V, se registraron valores de corriente de 0,178 A para la fase a y 0.210 A para la fase C, además que se pudo observar que la potencia trifásica activa va disminuyendo conforme la velocidad del viento aumenta en el lado de la red llegando a tener un valor de 19,544 W para las 6000 r.p.m. y los 12 m/s de velocidad del viento para los mismo valores de velocidad del viento y velocidad del generador se tiene la potencia reactiva con un valor de -13,437 VAR y una potencia aparente de 23,70 VA. Mientras que si vemos desde el lado de la PMSG se puede apreciar como entrega potencia según la velocidad del viento aumenta llegando a un valor de 11,38 W.

### 3.2 Conclusiones

- El emulador de generación eólica, disponible en el Laboratorio Físico de Sistemas Eléctricos de Potencia, puede conectarse con la red de la EEQ y así estudiar su factibilidad de operación en paralelo, para poder comprobar voltajes, corrientes y potencias.
- En las pruebas del emulador de energía eólica como única fuente se aprecia como para diferentes valores de cargas resistivas es capaz de entregar potencia incluso en su velocidad del viento más baja de 3 m/s hasta llegar a su velocidad nominal de 10 m/s en donde la potencia aumentaba, estos para las tres cargas resistivas de prueba lo que comprueba que el Emulador de Energía Eólica funciona de forma correcta.
- El emulador de energía eólica es una herramienta eficaz para el entendimiento del funcionamiento de una turbina eólica, generación de potencia mecánica y eléctrica, además que cuenta con varios parámetros ajustables que permiten visualizar puntos de operación diferentes dependientes de la velocidad del viento.
- El control vectorial de velocidad que realiza el emulador de energía eólica para la PMSG es de su importancia, debido a que permite que el cambio en la velocidad del viento no afecte al funcionamiento de la PMSG.
- El emulador de energía eólica cuenta internamente con los lazos de control de punto de máxima potencia MPPT y lazo de enclavamiento de fase PLL, que

permiten la conexión en paralelo con la red de la EEQ sea muy amigable, por supuesto hay que entender el correcto funcionamiento de los mismos, así como entender las señales que los activan.

- La prueba realizada de la PMSG en vacío permite establecer que se consigue su velocidad nominal de 6000 r.p.m. cuando el viento alcanza una velocidad de 10 m/s (Figura 39 y la Tabla 13).
- El lazo de control MPPT así como el lazo de control PLL funcionan por separado, es decir que ambos necesitan diferentes señales de voltaje y corriente para que sean activados; si se trata del MPPT únicamente se lo puede activar mediante señales proporcionadas desde el lado del generador como son corrientes del estator de la máquina de imanes permanentes, mientras que si se trata del PLL se activa únicamente desde el lado de la red eléctrica de la EEQ donde se requieren señales de voltaje de las tres fases y sus respectivas corrientes.
- En ambas activaciones de los lazos MPPT y PLL la única señal que comparten es la del voltaje de la barra DC, recalcando que existe la barra en el lado del rectificador y en el lado de inversor.
- Se aprecia en el funcionamiento individual de la PMSG como este es capaz de proporcionar potencia adecuada a un sistema de cargas resistivas trifásicas proporcionando valores de hasta los 30 W, pero a frecuencias superiores a los 60 Hz (a velocidad nominal de 6000 r.p.m. la frecuencia se establece en 300 Hz).
- Al momento de conectar en paralelo el emulador de energía eólica con la red de la EEQ, se puede apreciar como para velocidades bajas la potencia en el lado de la red es más alta que la potencia del generador, pero mientras la velocidad del viento aumenta se observa como la potencia en el lado de la red disminuye y la potencia del generador aumenta lo que demuestra que el emulador entrega potencia a la red de la EEQ.

### 3.3 Recomendaciones

- Tener en cuenta que a pesar de que el software LVDA-EMS brinda las conexiones necesarias para el funcionamiento correcto del emulador de generación eólica conectado con la red de la EEQ, se deben revisar las conexiones de multímetros y amperímetros, así como la conexión del transformador, la cual debe ser  $\Delta Y_1$ .

- Al momento de realizar el funcionamiento del aerogenerador conectado en paralelo a la red de la EEQ, tener en cuenta que al momento de activar el MPPT y PLL únicamente deben estar conectados los amperímetros y voltímetros de las conexiones dadas por el software LVDA-EMS, ya que si se conecta un amperímetro o voltímetro en el módulo de control y adquisición de datos pueda que este tome una señal que no es la correcta y uno de los lazos de control no funcione correctamente.
- Se podría ver la factibilidad de ingresar otra fuente de generación en paralelo que no sea la red de la EEQ con el emulador de generación eólica, puede ser el grupo motor-generator o el generador fotovoltaico y comprobar si es que el emulador es capaz de abastecer potencia en paralelo con a las diferentes fuentes de generación.
- Se recomienda realizar un estudio más detallado acerca del emulador de energía eólica en el cual se pueda establecer diferentes parámetros que permitan mejorar los valores de voltaje y potencia del generador con el fin de saber si es capaz de entregar más energía eléctrica a la red.
- Se recomienda realizar un trabajo que permita la entrega de energía a las cargas del Laboratorio, como iluminación, aparatos electrodomésticos únicamente con el aerogenerador.

## 4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. A. Bustos y C. Limaico, "Modelación y Simulación de un Control Vectorial de Velocidad de un Aerogenerador en Matlab", Proyecto de Titulación, Quito : Escuela Politécnica Nacional , 2019.
- [2] D. A. Motoche, "Medición de Parámetros de las Máquinas Síncrona de Imanes Permanentes y de Inducción Doblemente Alimentada del Emulador de Generación Eólica del Departamento de Energía Eléctrica", Proyecto de Titulación, Quito: Escuela Politécnica Nacional , 2019.
- [3] Festo Didactic Ltée Electricity and New Energy, *LabVolt Series, Manual de Usuario del Emulador de Generación Eólica*, Quebec, Canadá, 2018.
- [4] K. W. Cubi y A. C. Pilatuña, "Rediseño e Implementación del Grupo Motor DC-Generador Síncrono para el Laboratorio Físico de Sistemas Eléctricos de Potencia", Proyecto de Titulación, Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2019.
- [5] F. A. Jaramillo y B. J. Silva, "Diseño, Construcción e Implementación de un Generador Fotovoltaico para el Laboratorio de Sistemas Eléctricos de Potencia", Proyecto de Titulación, Quito : Escuela Politécnica Nacional , 2020.
- [7] J. A. Játiva, Libro "Laboratorio de Sistemas Eléctricos de Potencia", En revisión, Quito : Escuela Politécnica Nacional , 2022.
- [8] J. Játiva, "Informe Técnico Final Proyecto Junior PIJ 15 24: Modelación, Simulación, Control y Construcción de un Prototipo de Aerogenerador con Máquina Síncrona de Baja Velocidad de Imanes Permanentes", Quito: Vicerrectorado de Investigación, Innovación y Vinculación, Escuela Politécnica Nacional , 2009.

## **5 ANEXOS**

ANEXO I. Características del proveedor acerca del dinamómetro de cuatro cuadrantes/fuente de alimentación

ANEXO II. Características del módulo de carga resistiva

ANEXO III. Características del módulo de interfaz y control de adquisición de datos

ANEXO IV. Graficas de armónicos de voltaje para la fase A, B y C del lado de la red

ANEXO V. Graficas de armónicos de voltaje en el estator de la PMSG

## ANEXO I

- Características del proveedor acerca del dinamómetro de cuatro cuadrantes/fuente de alimentación.

Modo Dinamómetro		
Torque magnético		0 a 3 N.m (0 a 27 lbf.in)
Dirección de rotación		CW/CCW (Directa/Inversa)
Velocidad		0 a 2500 r/min
Potencia nominal		350 W
Modo Fuente de Alimentación		
Voltaje DC		0 a $\pm 150$ V
Voltaje AC (rms)		0 a 150 V ("sin carga")
Corriente DC		0 a $\pm 5$ A
Corriente AC (rms)		0 a 3,5 A
Potencia máxima de salida		500 W
Frecuencia AC		10 a 120 Hz
Otras Características		
Pantalla de cristal líquido (LCD)		76 mm (3 in), monocromática, fondo iluminado, 240 x 160
Entradas de control	Entrada de comando	0 a $\pm 10$ V
	Entrada Termistor	10 k $\Omega$ , tipo 1
Salidas de control	Codificador al eje	Codificador de cuadratura (A-B) – 360 pulsos/revolución – compatible con TTL
	Sensibilidad de salida del par	0,3 N.m/V (2,655 lbf.in/V)
	Sensibilidad de salida de velocidad	500 r/min/V
Puerto de comunicación		USB 2.0

## ANEXO II

- Características del proveedor acerca del módulo de carga resistiva

Carga Resistiva	
Cantidad de resistencias	Tres grupos idénticos de tres resistencias
Valores de resistencia (cada grupo)	300/600/1200 $\Omega$
Voltaje nominal	120 V ac/dc
Exactitud del valor de la resistencia	$\pm 5$
Carga a voltaje nominal (grupo)	
Potencia	12 – 84 W
Corriente	0,1 – 0,7 A
Pasos	Siete, de igual incremento
Incremento de corriente	0,1 A

### ANEXO III

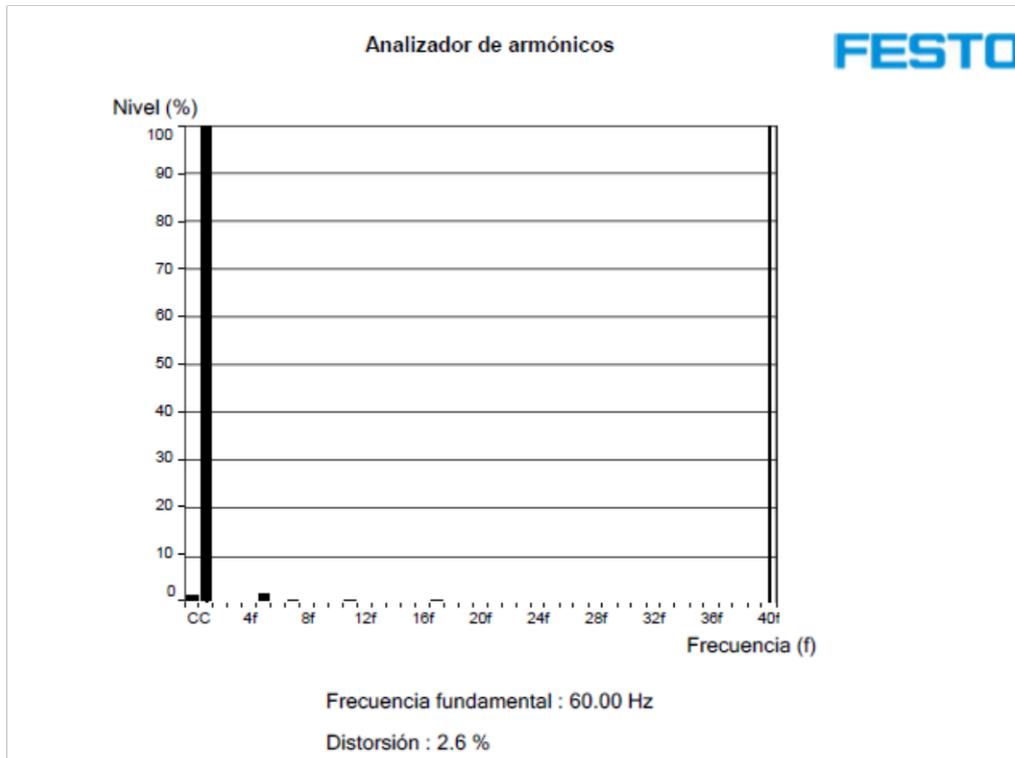
- Características del módulo de interfaz y control de adquisición de datos

Entradas de voltaje aisladas (4)	
Rango (bajo/alto)	-80 V a +80 V/-800 a +800 V (uso seleccionable a través del software)
Impedancia (bajo/alto)	326,6 k $\Omega$ /3,25 M $\Omega$
Banda ancha	DC a 65 kHz (-3dB)
Exactitud	1% (DC a 10 kHz)
Aislamiento	800 V
Nota	Diseñado para su uso dentro de la CATEGORIA DE MEDIDA I. Tensión de red $\leq$ 240 V
Entradas de corriente aisladas (4)	
Rango (bajo/alto)	-4 A a +4 A/-40 a +40 A (25 A RMS)
Impedancia (bajo/alto)	50 m $\Omega$ /5 m $\Omega$
Banda ancha	DC a 65 kHz (-3dB)
Exactitud	1% (DC a 10 kHz)
Aislamiento	800 V
Nota	Diseñado para su uso dentro de la CATEGORIA DE MEDIDA I. Tensión de red $\leq$ 240 V
Entradas analógicas (8)	
Rango de voltaje	-10 V a +10 V
Impedancia	> 10 M $\Omega$
Banda ancha	DC a 125 kHz
Parámetros de medida	Seleccionable por el usuario a través del software
Relación parámetro-volatje	Seleccionable por el usuario a través del software

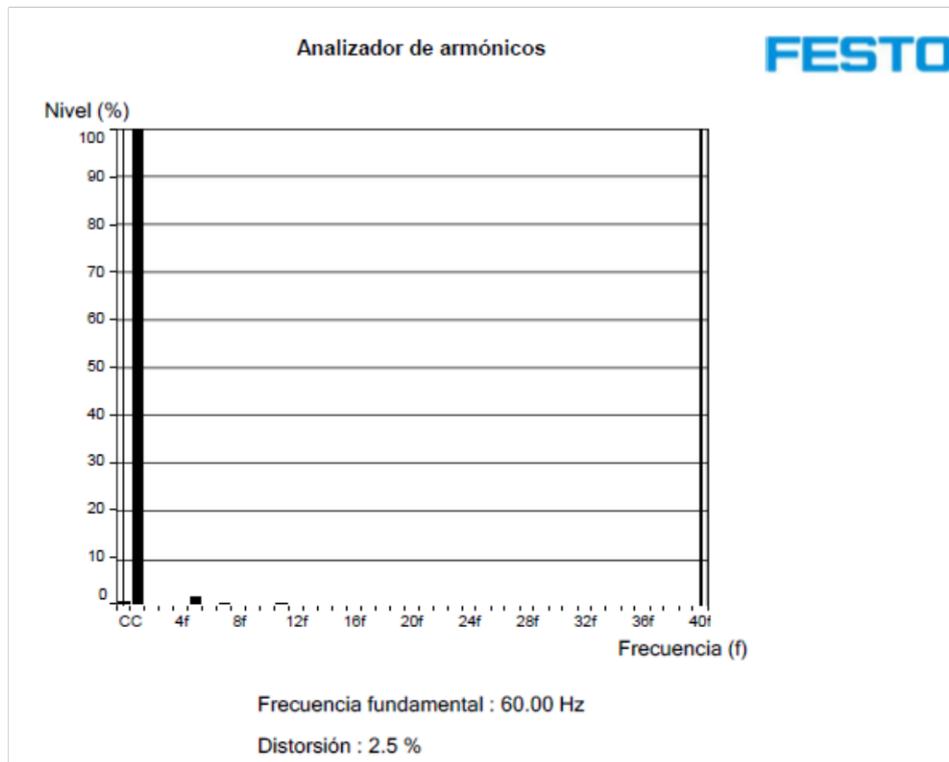
Convertidor A/D para entradas aisladas y analógicas (16)	
Tipo	Aproximación sucesiva
Resolución	12 bits
Linealidad no-integral	$< \pm 1.5$ LSB
Linealidad no-diferencial	$< \pm 1$ LSB
Tasa máxima de muestreo	600 kmuestras/s (un canal)
Tamaño del bufer FIFO	16 kmuestras
Salidas analógicas (2)	
Rango de voltaje	10 a +10 V
Impedancia de carga operativa	$> 600 \Omega$
Convertidor D/C para salidas analógicas (2)	
Tipo	Cadena de resistencia
Resolución	12 bits
Linealidad no-integral	$< \pm 8$ LSB
Linealidad no-diferencial	-0,5 a +0,7 LSB
Entradas digitales (3)	
Tipos	Codificador (2), sincronización (1)
Nivel de señal	0,5 V (TTL compatible)
Frecuencia de entrada máxima	50 kHz
Impedancia	5 k $\Omega$
Salidas digitales (9)	
Tipo	Control (seis en DB9 conector y 2 jacks banana de 2-mm) Sincronización (un conector a DB9)
Señal de nivel	0-5 V (TTL compatible)
Frecuencia máxima de salida	20 kHz (límite del software)
Impedancia	200 $\Omega$
Interfaz I/O computador	USB 2.0 a toda velocidad entrada tipo-B
Potencia de requerimiento	24 V – 0,4 A – 50/60 Hz
Accesorios	
2-m USB cable de conexión (1)	24-V cable de poder (1)
2-mm cables de prueba conector banana	Cable de control (1)

## ANEXO IV

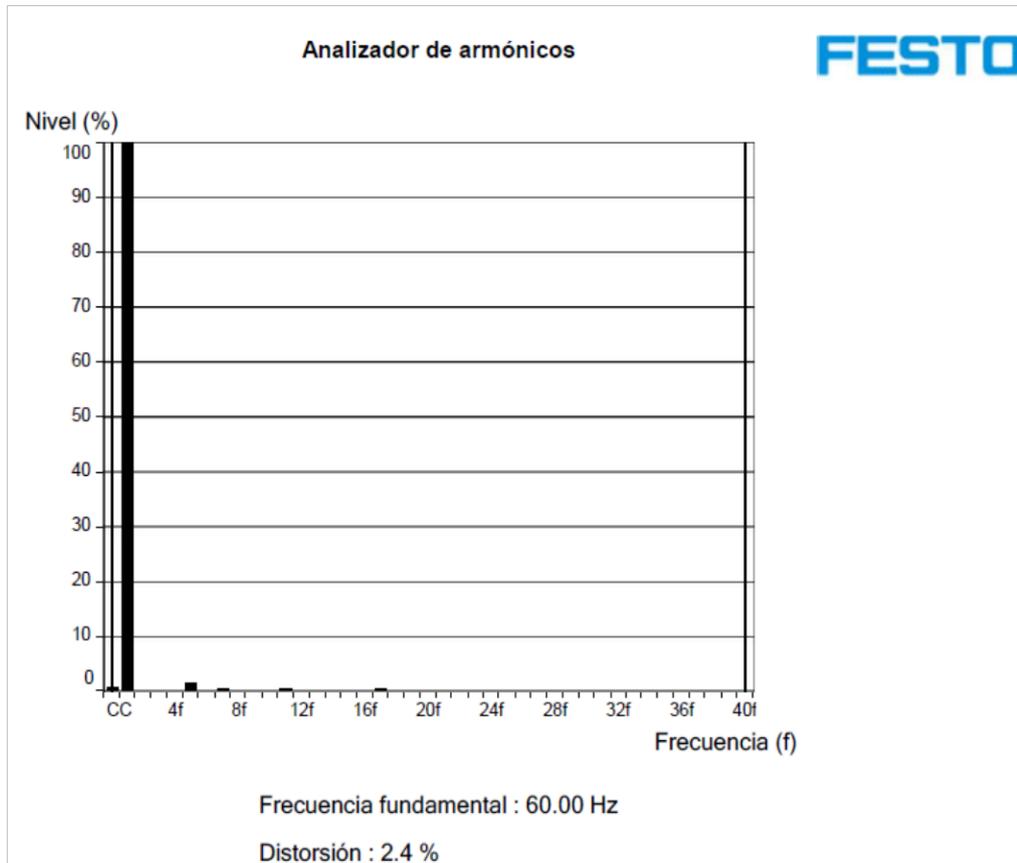
- Armónicos de voltaje de la fase A



- Armónicos de voltaje de la fase B

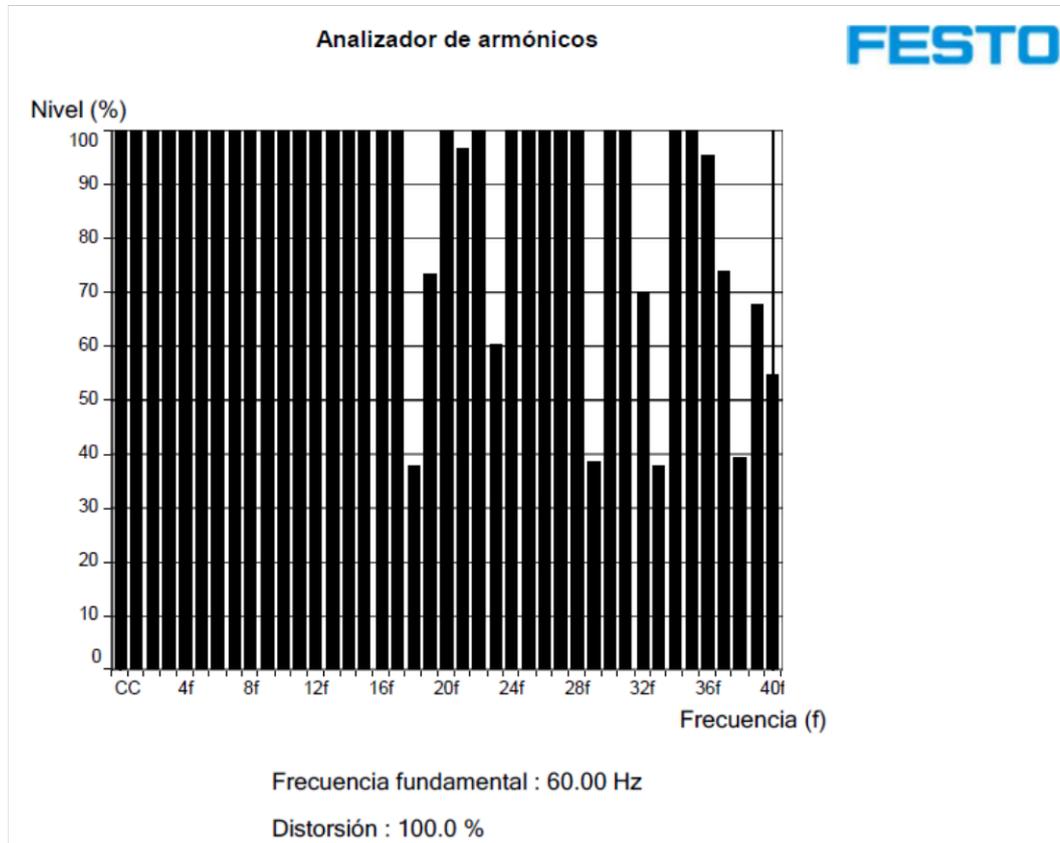


- Armónicos de voltaje de la fase C



## ANEXO V

- Armónicos de voltaje de la fase UV



Para las fases VW y WU se presenta la misma gráfica de armónicos.