

**GENERADOR DE IMÁN PERMANENTE TIPO RADIAL PARA LA INSTITUCIÓN  
UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO**

**ROMARIO ILLERA QUINTERO  
JHONATAN MAURICIO MESA OCHOA  
CARLOS MARÍN QUINTERO**

**INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
MEDELLÍN  
2025**

## Contenido

|                                                                                   |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. Planteamiento del problema</b>                                              | <b>4</b>  |
| 1.1 Descripción                                                                   | 4         |
| 1.2 Formulación                                                                   | 4         |
| <b>2. Justificación</b>                                                           | <b>4</b>  |
| <b>3. Objetivos</b>                                                               | <b>5</b>  |
| 3.1 Objetivo general                                                              | 5         |
| 3.2 Objetivos específicos                                                         | 5         |
| <b>4. Referentes teóricos</b>                                                     | <b>6</b>  |
| 4.1 Definición de magnetismo                                                      | 6         |
| 4.2 Fuerza Electromotriz Inducida (Lorentz)                                       | 7         |
| 4.3 Fuerza Electromotriz Inducida - Bobina de un Generador con Imanes Permanentes | 10        |
| 4.4 Clases de generadores de imanes permanentes                                   | 11        |
| 4.5 Fem inducida en una serie de conductores paralelos debida a imanes móviles    | 11        |
| <b>5. Metodología</b>                                                             | <b>13</b> |
| 5.1 Tipo de proyecto                                                              | 13        |
| 5.2 Método 1: Diseño y construcción del módulo experimental                       | 13        |
| Tabla 1. Equipos principales:                                                     | 13        |
| 5.2.1 Cálculos de potencia mecánica requerida y torque:                           | 16        |
| • Cálculo del par (torque) al eje a la velocidad nominal 550 RPM:                 | 16        |
| • Cálculo de frecuencia del generador:                                            | 17        |
| • Cálculos de conversión, rectificación y dimensionado del puente rectificador:   | 18        |
| • Cálculos de resistencias de Níquel–Cromo (cargas de prueba):                    | 18        |
| • Cálculos de cargas parciales :                                                  | 19        |
| 5.2.2 Metodología de armado del módulo :                                          | 19        |
| 5.3 Método 2: Pruebas experimentales y análisis del desempeño                     | 21        |
| 5.4 Método 3: Elaboración de guías y documentación técnica                        | 39        |
| 5.5 Población y muestra.                                                          | 41        |
| 5.6 Instrumentos de recolección de información.                                   | 41        |
| <b>6. Resultados de la propuesta</b>                                              | <b>43</b> |
| <b>7. Cronograma de actividades</b>                                               | <b>49</b> |
| <b>8. Presupuesto</b>                                                             | <b>50</b> |
| <b>9. Bibliografía</b>                                                            | <b>51</b> |

## **Introducción**

La formación en ingeniería eléctrica requiere espacios de aprendizaje que permitan a los estudiantes interactuar con tecnologías reales de conversión de energía. Por eso, es importante contar con herramientas que faciliten el estudio práctico de sistemas de generación en condiciones controladas.

Para responder a esta necesidad, se propone el diseño e implementación de un módulo teórico-práctico basado en un generador de imán permanente tipo radial. Este módulo busca apoyar la enseñanza de temas como la conversión de energía, el diseño de máquinas eléctricas y el análisis de eficiencia energética.

## **1. Planteamiento del problema**

### **1.1 Descripción**

La formación en ingeniería eléctrica debe combinar la teoría con la práctica para que los estudiantes comprendan mejor cómo funciona la generación de energía. Sin embargo, muchos programas no cuentan con los equipos necesarios para hacer pruebas reales, especialmente con generadores de imán permanente, que son cada vez más usados en sistemas modernos. En la Institución Universitaria Pascual Bravo no se dispone de un banco de pruebas para este tipo de generación, lo que limita el aprendizaje práctico de los estudiantes. Contar con este equipo permitiría mejorar los laboratorios, fortalecer la calidad de la enseñanza y preparar mejor a los futuros profesionales.

### **1.2 Formulación**

¿Será que, con la implementación de un banco de pruebas de generación eléctrica mediante imán permanente, los estudiantes de ingeniería eléctrica y programas afines de la Institución Universitaria Pascual Bravo podrán integrar de forma efectiva sus conocimientos teóricos y prácticos a través de experiencias de laboratorio?

## **2. Justificación**

Este proyecto fortalece las prácticas educativas en ingeniería eléctrica en la Institución Universitaria. Al combinar la teoría con la práctica mediante el uso de un generador de imán permanente, se facilita la comprensión de conceptos como la conversión de energía, el diseño de máquinas eléctricas y la eficiencia energética. Este enfoque permite a los estudiantes aplicar los conocimientos adquiridos en un entorno controlado, favoreciendo un aprendizaje más profundo.

El proyecto beneficia a estudiantes y docentes al proporcionar una herramienta pedagógica para la experimentación directa con sistemas de generación eléctrica, permitiendo analizar su rendimiento y eficiencia bajo diversas condiciones.



### **3. Objetivos**

#### **3.1 Objetivo general**

Construir un módulo experimental basado en un generador de imán permanente que permita la adquisición de datos en tiempo real y la medición de variables eléctricas.

#### **3.2 Objetivos específicos**

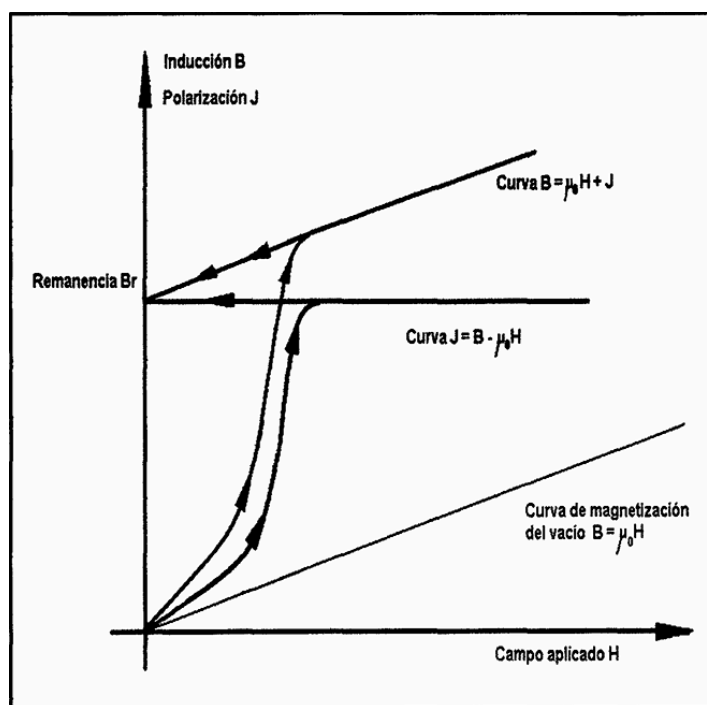
- Diseñar un módulo experimental con un generador de imán permanente, incorporando un motor de empuje, rotor, y monitor de redes para la medición en tiempo real.
- Analizar el desempeño del generador en condiciones de carga variables, para determinar su eficiencia.
- Elaborar guía de práctica de laboratorio que contengan los planos eléctricos y fichas técnicas de los componentes que conforman el módulo de pruebas.

## 4. Referentes teóricos

### 4.1 Definición de magnetismo

Define magnetismo como la propiedad de los imanes y las corrientes eléctricas de ejercer acciones a distancia, tales como atracciones y repulsiones mutuas, imanación por influencia y producción de corrientes eléctricas inducidas. (Muñoz, 2008)

**4.1.1 Imán permanente:** Define al imán permanente como la capacidad de un material de retener un valor de magnetismo remanente después de ser imantado por algún medio. Además de ser resistente a la desmagnetización, un imán permanente tiene la propiedad de conservar su magnetismo con el tiempo. Los imanes permanentes también llamados materiales magnéticos duros presentan una alta remanencia. En el siguiente gráfico se observa el comportamiento del imán permanente, la remanencia es próxima a la polarización de saturación: (Murillo Julián, 2012)

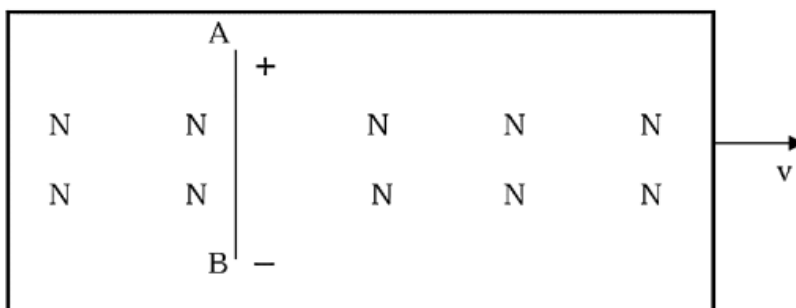


*Figura 1* Curva de Magnetización en los imanes permanentes

Fuente. (Murillo Julián, 2012).

## 4.2 Fuerza Electromotriz Inducida (Lorentz)

Un generador de imanes permanentes consta de un conjunto de imanes que "se mueven" frente a unas bobinas "fijas". La fórmula de Lorentz se aplica a los conductores que forman la espira. En un generador de imanes permanentes los conductores que forman las espiras permanecen quietos y son los imanes los que se mueven: (Navarra Hervas, 2007)

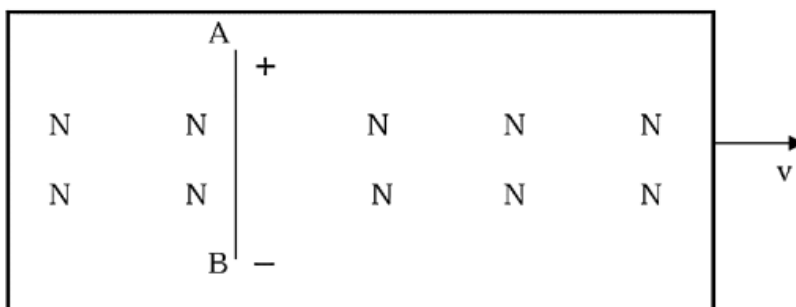


*Figura 2 Imán Permanente Polo Norte*

Fuente. (Navarra Hervas, 2007)

En este dibujo, el imán se mueve hacia la derecha, y el segmento está en reposo. Esta situación es equivalente, por movimiento relativo, a que el imán se encuentre en reposo y el conductor se mueva hacia la izquierda. Es por ello que para mantener la polaridad de la F.E.M.

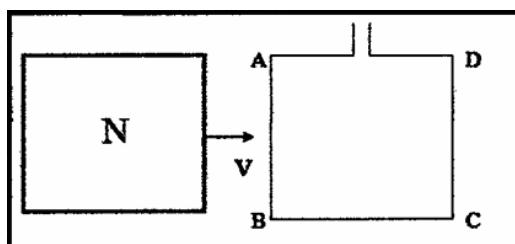
inducida en el segmento conductor, el polo Norte del imán está en la cara superior de la hoja de papel y el campo magnético sale del papel. Si el polo Sur del imán está en la cara superior de la hoja de papel, y el imán se mueve hacia la derecha, la tensión generada en el segmento AB es la representada en la figura siguiente.



*Figura 3 Imán Permanente Polo Sur*

Fuente. (Navarra Hervas, 2007)

Consideraremos a continuación que un imán se mueve hacia a la derecha y pasa enfrente (y por debajo) de una espira cuadrada abierta, que consideramos formada por tres segmentos, dos verticales y el otro horizontal, conectados entre sí, y el cuarto segmento, que cerraría la espira, este partido en su mitad y abierto. Por simplicidad en la explicación, la superficie del imán es ligeramente inferior a la de la espira (considerada cerrada), y la anchura del imán es igual a la de la espira. Cuando el imán pase enfrente de los segmentos verticales AB y CD inducirá FEM en ellos cuya polaridad estará de acuerdo con lo presentado anteriormente.

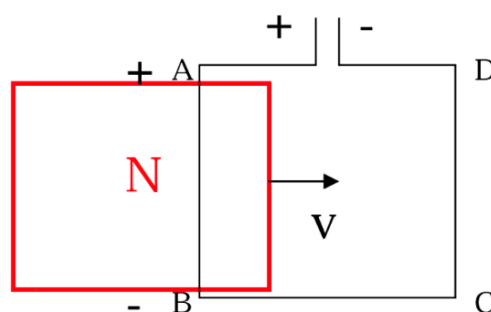


*Figura 4 Primera posición del imán*

Fuente: (Navarra Hervas, 2007)

En primera posición el imán está pasando enfrente del primer lado de la espira (lado AB), la polaridad será  $\delta$  = polo negativo.

La polaridad total de la espira será la que se muestra en la figura

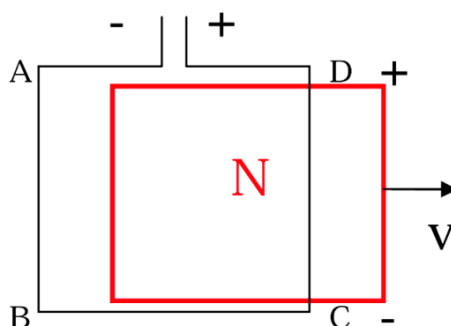


*Figura 5 Polaridad de la Espira AB*

Fuente: (Navarra Hervas, 2007)

Segunda posición el imán está pasando enfrente del segundo lado de la espira (lado eo), la polaridad será  $\epsilon$  = **polo negativo**.

En el lado AB no se induce tensión



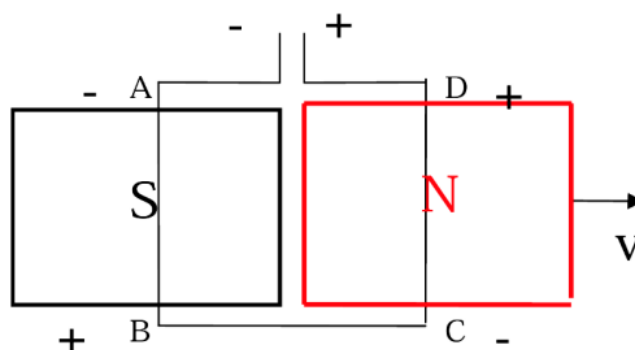
*Figura 6 Polaridad de la Espira DC*

Fuente: (Navarra Hervas, 2007)

Si el polo del imán que está pasando enfrente de la espira es S en vez de N, las polaridades de la espira son las inversas de las explicadas en los dos casos anteriores.

A continuación, consideraremos dos imanes cuyos polos son opuestos, y que pasan enfrente de la espira. El primer imán está pasando enfrente del segmento DC, y el segundo imán ya está enfrente del segmento AB. Entonces se inducen tensiones en ambos segmentos, con la polaridad

A = Polo negativo C = Polo negativo B = Polo positivo

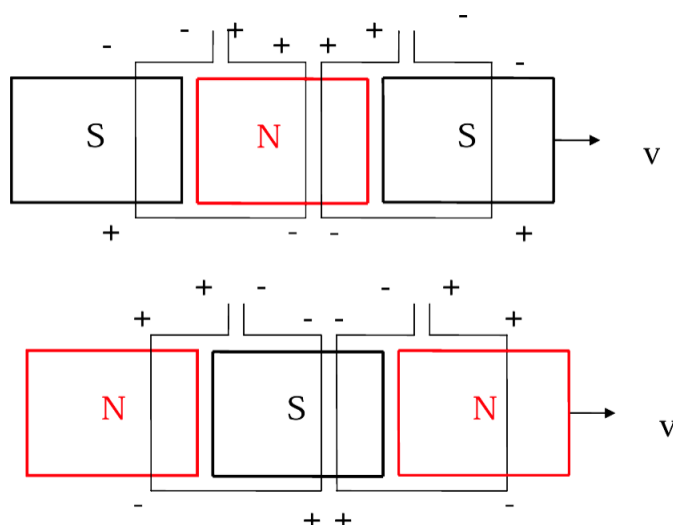


*Figura 7 Dos Imanes de Polaridad Opuesta*

Fuente: (Navarra Hervas, 2007)

El resultado es una espira con una tensión doble, debida a la suma de las tensiones de los dos segmentos. Si consideramos una hilera de imanes, uno tras otro, con los polos magnéticos invertidos, pasando enfrente de una espira, la polaridad de la espira será la mostrada en la figura anterior, cuando el polo N de un imán esté enfrente del segmento DC, y será la contraria cuando el polo N de uno imán esté enfrente del segmento AB.

Por último, se considerará el caso de una hilera de imanes con los polos magnéticos alternos, que pasan en frente de dos espiras. la separación entre las espiras es la misma que la separación entre los imanes. Las espiras contiguas tienen polaridades contrarias.

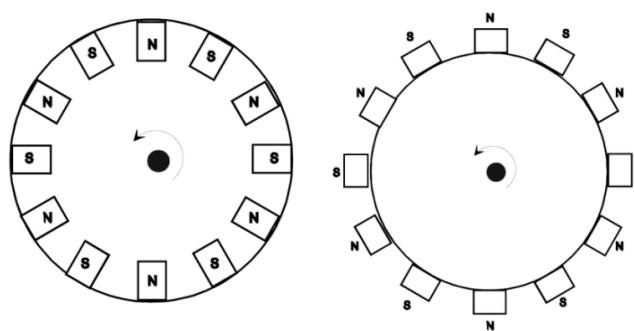


*Figura 8 Hilera de imanes con los polos magnéticos alternados*

Fuente: (Navarra Hervas, 2007)

### 4.3 Fuerza Electromotriz Inducida - Bobina de un Generador con Imanes Permanentes

Un generador de imanes permanentes de flujo radial es un tipo de generador eléctrico en el que el campo magnético creado por imanes permanentes en el rotor se extiende radialmente (desde el centro hacia fuera o viceversa), cruzando los devanados del estator para inducir corriente eléctrica.



*Figura 9 Tipos de generadores Imán permanente Izquierda AXIAL Derecha Radial*

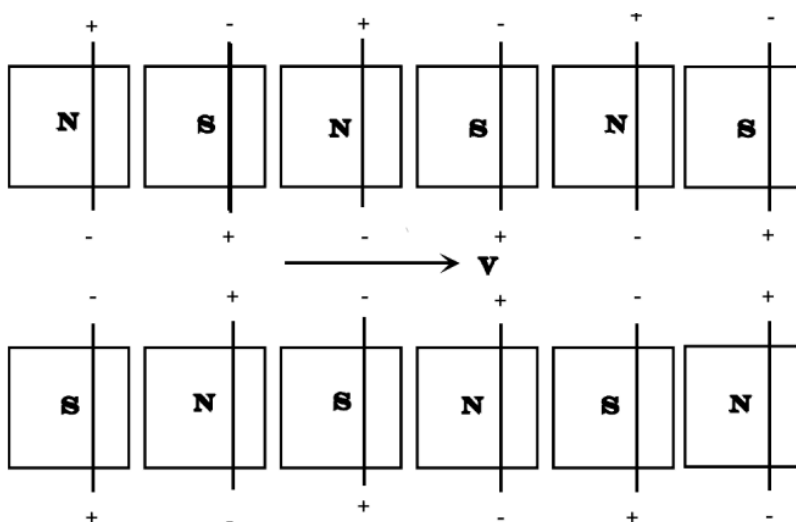
Fuente: (Navarra Hervas, 2007).

#### 4.4 Clases de generadores de imanes permanentes

En el apartado anterior se describe en la figura 9 una fila de imanes que se mueve con velocidad “lineal” frente a un grupo de espiras. Dicha situación no es la que se da en los generadores eléctricos, sino que los imanes se mueven con velocidad “circular”. Según sea el eje de giro, los generadores son de dos tipos, de flujo axial y de flujo radial. En los generadores de flujo axial, los imanes se disponen sobre un disco de hierro que gira alrededor de un eje perpendicular que pasa por su centro. Así pues, el campo magnético de los imanes es paralelo al eje de giro, y de ahí la frase “flujo axial” que realmente significa campo magnético paralelo al eje de giro. En los generadores de flujo radial, los imanes se colocan sobre la superficie lateral de un cilindro que gira alrededor de su propio eje. En este caso el campo magnético de los imanes es perpendicular al eje de giro, y por tanto va en dirección radial, y de ahí la frase “flujo radial” que realmente significa campo magnético en dirección radial o perpendicular al eje de giro.

#### 4.5 Fem inducida en una serie de conductores paralelos debida a imanes móviles

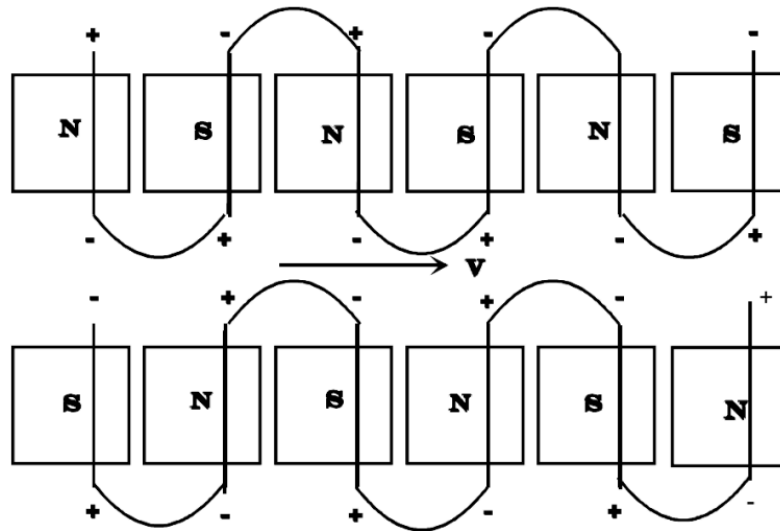
Supongamos un conjunto de imanes de igual tamaño y equidistantes entre sí, con los polos alternados, que se mueven con velocidad  $v$  por delante de un conjunto de segmentos conductores paralelos y equiespaciados, tal como se muestra en la figura 10. Según la Ley de Lorentz.



*Figura 10 Fem inducida en una serie de conductores paralelos debida a imanes móviles*

Fuente: (Navarra Hervas, 2007)

La polaridad inducida en los segmentos debido al movimiento de los imanes, permite unirlos conforme se muestra en la figura 11.



*Figura 11 Polaridad inducida en los segmentos debido al movimiento de los imanes*

Fuente: (Navarra Hervas, 2007)

La fuerza electromotriz inducida entre los extremos de todos los segmentos será la suma de la inducida en todos ellos, y como es la misma en cada uno de los segmentos, la fem total será la inducida en uno de ellos, por el número de segmentos:

$$\varepsilon = nvBL$$

donde n es el número de segmentos y l es la longitud de uno de ellos. Si los imanes se mueven con un movimiento circular frente a los segmentos, la fem inducida será

$$\varepsilon = wrBnL$$

Como en la pregunta anterior, si se desea expresar  $\omega$  en rpm, la expresión para el valor eficaz de la fem inducida en el conjunto de segmentos será

$$\varepsilon_e = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{2\pi}{60} (Rpm) r B n l = 0.074 (Rpm) r B l$$

donde r es el radio de giro de los imanes, B el campo magnético y L es la longitud total de los n segmentos, esto es  $nl = L$ .



## 5. Metodología

### 5.1 Tipo de proyecto

El proyecto se clasifica como desarrollo experimental, dado que se enfoca en la construcción de un módulo físico para la observación y análisis de variables eléctricas a partir de un generador de imán permanente. Este tipo de proyecto implica la aplicación de conocimientos previos en electricidad, máquinas rotativas y medición de variables, con el propósito de diseñar y validar un sistema funcional de generación eléctrica a través de pruebas controladas en laboratorio.

El desarrollo experimental es apropiado cuando se busca generar conocimiento práctico mediante la implementación de prototipos reales que puedan ser observados, evaluados y utilizados en contextos educativos o técnicos. En este caso, se construye un banco didáctico que facilita la comprensión del principio de funcionamiento y comportamiento de un generador de imán permanente, integrando monitores y equipos de medición en tiempo real.

### 5.2 Método 1: Diseño y construcción del módulo experimental

**Tabla 1. Equipos principales:**

| <b>Equipo / Item</b>             | <b>Especificaciones principales</b>                                                                                                                 | <b>Función en el módulo</b>                                                       | <b>Justificación técnica de selección</b>                                                                                           |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>VFD 2.2 kW / 3 HP / 220 V</b> | Entrada monofásica o trifásica 220 V, salida trifásica 0–400 Hz, 15 A salida, control vectorial, parámetros de rampa, torque y límite de frecuencia | Controlar el motor de arrastre; permitir variación de rpm y torque, rampas suaves | Sobredimensionado respecto al motor previsto (0.6–0.75 kW), protege frente a picos y entrega control fino para optimizar eficiencia |

| <b>Equipo / Item</b>                    | <b>Especificaciones principales</b>                                                 | <b>Función en el módulo</b>                          | <b>Justificación técnica de selección</b>                                                                            |
|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Motor 220 VAC</b>                    | Pendiente lectura placa; recomendar 0.6–0.75 kW, trifásico                          | Proveer energía mecánica al generador                | Potencia superior a los 444 W requeridos (margen 35–70%) para cubrir pérdidas y picos                                |
| <b>Generador AVAN-400W</b>              | 400 W, 550 RPM, imanes NdFeB, IP55, Clase F, salida trifásica AC (sin rectificador) | Fuente de generación eléctrica para pruebas          | Compacto y robusto; define la referencia de potencia del banco experimental                                          |
| <b>Puente rectificador trifásico</b>    | 50 A / 1200 V, módulo aluminio con disipación térmica                               | Rectificar salida AC a DC ( $\approx 24$ V DC)       | Sobredimensionado frente a la corriente esperada ( $\sim 16.7$ A) para confiabilidad térmica                         |
| <b>Osciloscopio FNIRSI 1013D</b>        | 2 canales, 100 MHz, 1 GSa/s, sonda 100×                                             | Medición de formas de onda, transitorios y armónicos | Portátil y suficiente para diagnósticos en el banco de pruebas                                                       |
| <b>Inversor onda senoidal pura 800W</b> | 24 V DC $\rightarrow$ 110/120 V AC, 800 W continuo                                  | Alimentar cargas 110 V desde banco DC                | Permite conectar cargas convencionales; potencia suficiente con margen frente a 400 W generador                      |
| <b>Medidor KWS-AC301L</b>               | V AC 50–300 V, I 0–100 A, RS485, medición P, $\cos\phi$ , Hz                        | Medición RMS y energética en rangos $\geq 50$ V      | Excelente para monitoreo de variables eléctricas en las salidas de carga, después de inversor de señales eléctricas. |

| <b>Equipo / Item</b>                                        | <b>Especificaciones principales</b>                                                                                                                                                                                                        | <b>Función en el módulo</b>                                     | <b>Justificación técnica de selección</b>                                                                                  |
|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Breaker motor / VFD</b>                                  | 20 A, curva C, 3 polos, 220 VAC                                                                                                                                                                                                            | Protección en la alimentación del motor y VFD                   | El VFD admite ~15 A salida; breaker 20 A soporta picos de arranque y protege frente a sobrecorriente sostenida             |
| <b>Protección salida generador (AC 24 V)</b>                | 25 A, curva C, 3 polos (30 VAC mínimo de corte)                                                                                                                                                                                            | Protección de la salida del generador (24 VAC $\approx$ 16.7 A) | 25 A cubre la corriente nominal y pequeños picos sin disparos falsos                                                       |
| <b>Tomas 110 VAC</b>                                        | 2 $\times$ NEMA 5-15, 15 A                                                                                                                                                                                                                 | Puntos de conexión para cargas 110 VAC                          | Conectadas a la salida del inversor 800W para pruebas con equipos convencionales sin sobrecargar el inversor               |
| <b>Resistencias de carga (tungsteno) — banco escalonado</b> | <b>R1:</b> 10 W $\rightarrow$ 1480 $\Omega$ (I=0.081 A);<br><b>R2:</b> 20 W $\rightarrow$ 744.5 $\Omega$ (I=0.17 A);<br><b>R3:</b> 30W $\rightarrow$ 496.1 $\Omega$ (I=0.24 A);<br><b>R4:</b> 40 W $\rightarrow$ 372.1 $\Omega$ (I=0.33 A) | Cargas resistivas para ensayos<br>2.5/5.0/7.5/10%               | Permiten verificar eficiencia y curvas de rendimiento; diseñar resistencias con margen (2 $\times$ potencia) y ventilación |
| <b>Cables</b>                                               | Calibre #10 AWG. Apta para corrientes de operación en todas las etapas (control de velocidad, generación, rectificación, inversor y salidas de carga).                                                                                     | Seguridad eléctrica y reducción de pérdidas                     | Evitar calentamientos y caídas de tensión; proteger componentes ante fallos.                                               |

### 5.2.1 Cálculos de potencia mecánica requerida y torque:

- **Potencia mecánica en el eje** (considerando eficiencia del generador)

- $P_e = 400W$  (potencia eléctrica nominal)

- **Eficiencia del generador**

- $\eta_{gen} = 90\%$  , acorde al uso de imanes NdFeB y diseño informado en la ficha.

- $P_{mec} = 400 \times 0.90 = 360W$

Nota: Esta es la potencia mecánica que debe entregarse al eje del generador.

- **Cálculo del par (torque) al eje a la velocidad nominal 550 RPM:**

- $\tau = \frac{P}{\omega}$

- $\omega = 2\pi \frac{rpm}{60}$

**Calcular  $\omega$ :**

- $\omega = 2\pi \frac{550}{60} = 57.5958 \text{ rad/s}$

- **Calcular torque** usando la potencia eléctrica (o la mecánica; para torque usamos la potencia en el eje —  **$P_e$**  para torque del generador eléctrico o  **$P_{mec}$**  para torque requerido del motor; muestro ambos):

- $P_e = 400W$

- $\tau_{gen} = \frac{P}{\omega} = \frac{400}{57.5958} = 6.9449Nm$

- $\tau_{motor} = \frac{P}{\omega} = \frac{360}{57.5958} = 6.2504Nm$

- **Conclusión de torque:** A **550 RPM** el generador desarrolla aproximadamente **6.95 Nm** eléctrico, y el motor deberá entregar en el eje ~ **6.25 Nm** considerando eficiencia del generador.

- **Calcular rpm a partir de la variación de frecuencia:**

- **Datos de placa de motor**

- rpm nominal: 1600
- frecuencia: 60 Hz

- *rpm = si a 60 Hz son 1600 rpm, cuantos Hz son 550 rpm*

- $Hz_{motor} = \frac{60Hz}{x} \times \frac{1350 rpm}{550 rpm} = 24.44 Hz$

- Set nominal del variador 24.44 Hz para que el motor de empuje garantice 550 rpm en el eje del generador. Con base a ello, se debe setear una rampa de aceleración de 4 pasos distribuidos cada uno con un crecimiento de 6.11 Hz

- **Nota:** No se debe setear el variador u operar el mismo de forma manual, superando los Hz nominales o los rpm del generador nominal, dado a que por condiciones de fabricación, este sufrirá fallas destructivas, alterando las variables eléctricas de generación. Además, ocasionará alarma en la etapa de inversor de señal eléctrica, por rango de voltaje máximo de operación, superiores a 30 voltios DC)

- **Cálculo de frecuencia del generador:**

- $f = \frac{P.n}{120}$

La velocidad del generador se incrementó de manera progresiva en cinco escalones: 150, 300, 450, 600, 750 rpm.

- $f = \frac{12.150}{120} = 15Hz$

- $f = \frac{12.300}{120} = 30Hz$

- $f = \frac{12.450}{120} = 45Hz$

- $f = \frac{12.600}{120} = 60Hz$

$$\circ \quad f = \frac{12.750}{120} = 75Hz$$

- **Cálculos de conversión, rectificación y dimensionado del puente rectificador:**

El generador se entrega **sin rectificador 24 VAC**. Al rectificar la salida trifásica a DC a 24 V nominal, la corriente DC esperada para 400 W es:

$$\circ \quad I_{DC} = \frac{P}{V} \times \frac{400W}{24VAC} = 16.666666 A$$

Puente rectificador trifásico **50 A / 1200 V** es **más que suficiente** para el proceso de rectificación, dado que la corriente a trabajar está por debajo de la nominal del equipo de rectificación (margen  $\approx 3\times$ )

- **Cálculos de resistencias de Níquel–Cromo (cargas de prueba):**

Datos base:

- Potencia máxima:  $P = 400 W$
- Tensión:  $V=110VAC$
- Resistencia equivalente:

$$R = \frac{V^2}{P} = \frac{110^2}{400} = 30.25\Omega$$

- Corriente nominal:

$$I = \frac{P}{V} = \frac{400}{110} = 3.636363A$$

- **Cálculos de cargas parciales :**

- Cálculo de resistencias y corrientes a (10 W, 20 W, 30 W, 40 W) para los ensayos en 2.5%, 5%, 7.5% y 10% de carga.

$$R = \frac{V^2}{P} = \frac{122^2}{10} = 1480\Omega$$

$$I = \frac{P}{V} = \frac{10}{122} = 0.081A$$

$$R = \frac{V^2}{P} = \frac{122^2}{20} = 744.2\Omega$$

$$I = \frac{P}{V} = \frac{20}{122} = 0.17A$$

$$R = \frac{V^2}{P} = \frac{122^2}{30} = 496.1\Omega$$

$$I = \frac{P}{V} = \frac{30}{122} = 0.24A$$

$$R = \frac{V^2}{P} = \frac{122^2}{40} = 372.1\Omega$$

$$I = \frac{P}{V} = \frac{40}{122} = 0.33A$$

### 5.2.2 Metodología de armado del módulo :

El proceso inició con el **diseño dimensional del módulo**, definiendo las medidas y posiciones de los componentes principales: generador, motor de arrastre, rectificador, inversor y sistema de medición. Con estas dimensiones se elaboró una **plantilla en CAD**, que luego fue fabricada en **acrílico mediante corte láser**, permitiendo marcar con precisión los puntos de fijación y garantizar la alineación entre el motor y el generador antes del perforado definitivo.

Posteriormente se realizó el **montaje mecánico**, fijando el generador y el motor sobre la estructura, instalando el acople flexible y corrigiendo la alineación axial y radial para

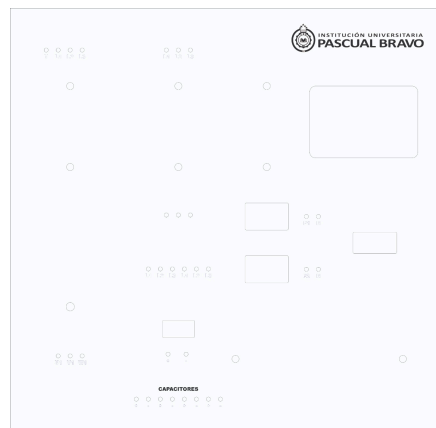
evitar vibraciones. Se adicionaron los soportes para los módulos de rectificación, el inversor y la instrumentación.

Luego se ejecutó el **montaje eléctrico**, conectando la salida trifásica del generador al rectificador y de allí al inversor, integrando sensores de tensión, corriente y velocidad. Se instalaron protecciones básicas (breaker, fusibles y paro de emergencia) y se organizó el cableado para minimizar interferencias.

Finalmente, se efectuaron **pruebas de verificación** del sistema: continuidad eléctrica, aislamiento, giro en vacío y generación inicial, dejando el módulo listo para ensayos y caracterización.

Procesos:

- Diseño dimensional y distribución de componentes.
- Creación de plantilla CAD y fabricación en acrílico por corte láser.
- Marcación y perforado de la estructura.
- Montaje mecánico del generador, motor y acople.
- Instalación de rectificador, inversor y medición.
- Cableado y protecciones eléctricas.
- Integración de sensores.
- Pruebas de continuidad, aislamiento y generación inicial.
- Ver planos en anexos.



*Figura 12 Módulo de equipos*

Fuente: (Diseño por Romario Illera, Jonathan Mesa, Carlos Marin)



### 5.3 Método 2: Pruebas experimentales y análisis del desempeño

Se definió un protocolo de pruebas que contempló dos escenarios:

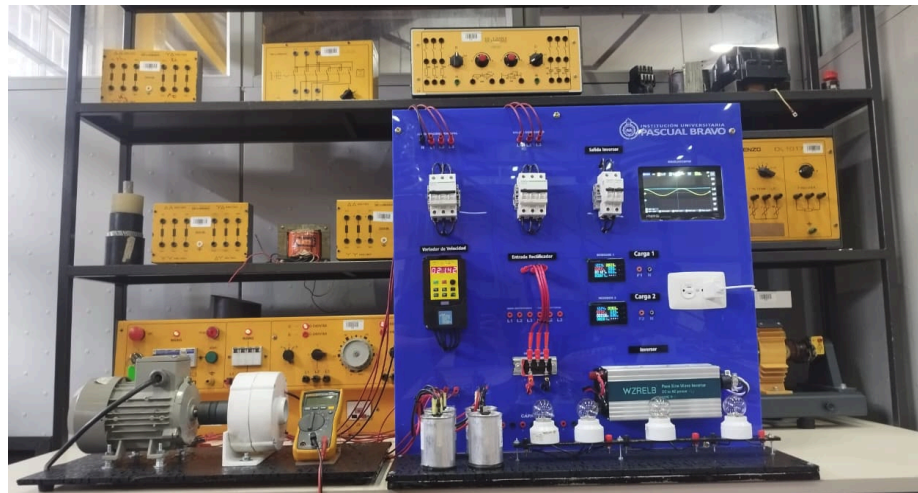
- **Prueba en vacío**

La prueba en vacío se realizó con el generador operando sin carga conectada, incrementando la velocidad de rotación en cinco escalones de 300, 375, 450, 500 y 550 rpm, hasta alcanzar la velocidad nominal. El objetivo fue registrar el comportamiento de las variables eléctricas principales en condiciones de operación sin carga.

- **Metodología de la prueba en vacío**

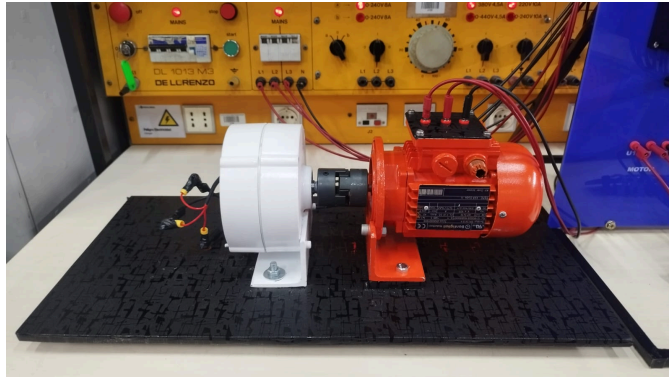
- **Preparación del sistema de generación**

- Se verificó previamente el estado operativo del generador, así como los sistemas de protección, control y medición.



*Figura 13 Verificación de Módulo de equipos*  
Fuente: (Diseño por Romario Illera, Jonathan Mesa, Carlos Marin)

- Se inspeccionó el motor de arrastre, asegurando que estuviera en condiciones adecuadas para variar la velocidad de forma controlada.



*Figura 14 Verificación del generador y motor de arrastre*

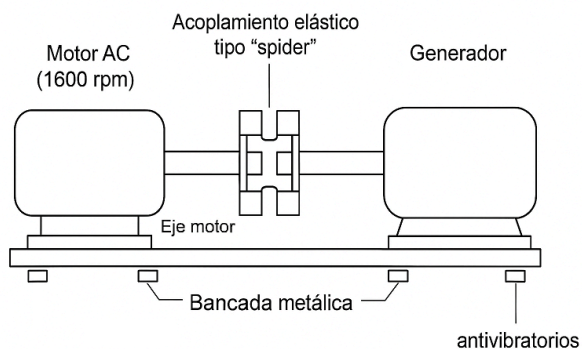
Fuente: (Diseño por Romario Illera, Jonathan Mesa, Carlos Marin)

#### ○ **Conexión y verificación inicial**

- El generador se acopló mecánicamente al motor de arrastre, garantizando la alineación angular y axial de ambos ejes mediante un acoplamiento elástico tipo “spider” (también llamado *jaw coupling*). Este tipo de acoplamiento fue seleccionado porque:
  - Compensaba pequeñas desalineaciones axiales, radiales y angulares.
  - Reducía vibraciones y protegía tanto al motor como al generador de picos de par.
  - Facilitaba el montaje y desmontaje sin necesidad de retirar completamente los equipos.

Los ejes de ambos equipos fueron fijados mediante tornillos prisioneros, asegurando la transmisión directa del par sin deslizamiento. El conjunto motor–generador se montó sobre una bancada metálica común con pernos de anclaje y bloqueo antivibratorio, lo cual aseguró estabilidad mecánica y minimizó resonancias.

Este esquema de montaje garantizó la transferencia eficiente de potencia del motor hacia el generador y, al mismo tiempo, protegió el sistema frente a desalineaciones y esfuerzos dinámicos.



*Figura 15 Acoplamiento entre eje de motor de empuje y eje del generador*

Fuente: (Diseño por Romario Illera, Jonathan Mesa, Carlos Marin)

- Se comprobó que los instrumentos de registro estuvieran calibrados para garantizar la validez de los datos obtenidos en la caracterización del generador síncrono de imanes permanentes acoplado al motor de arrastre.

Para la medición eléctrica y mecánica se utilizaron los siguientes instrumentos:

- **Tacómetro digital de contacto/no contacto:** empleado para verificar la velocidad de giro del eje del motor de arrastre y del generador, asegurando la correlación entre rpm y frecuencia generada.
- **Multímetro digital de precisión True RMS:** utilizado para la verificación de tensiones y corrientes trifásicas en la salida del generador a 24 V AC.
- **Osciloscopio digital de dos canales:** utilizado para la visualización y verificación de la forma de onda de las señales antes y después de la etapa de rectificación.
- **Pinza amperimétrica True RMS:** empleada para la medición de corrientes en cada fase bajo diferentes condiciones de carga.
- **Monitores de display multifunción (6 variables):** utilizados para la lectura continua de **potencia activa, factor de potencia, tensión, corriente, frecuencia y consumo eléctrico acumulado.**

Todos los instrumentos de medición fueron contrastados con un **equipo patrón de calibración certificado**, lo cual permitió corroborar que las lecturas se encontraban dentro de los márgenes de tolerancia establecidos. Esto aseguró la confiabilidad de los datos registrados tanto en la etapa de generación trifásica a 24 V AC como en los procesos posteriores de rectificación e inversión de onda para el suministro eléctrico a las cargas.

- Se inició la operación en vacío, verificando que no existiera ninguna carga conectada al generador.



*Figura 16 Verificación del módulo para prueba en vacío*  
Fuente: (Diseño por Romario Illera, Jonathan Mesa, Carlos Marin)

#### ■ Incremento escalonado de la velocidad

- La velocidad del generador se incrementó de manera progresiva en cinco escalones: 150, 300, 450, 600, 750 rpm.



*Figura 17 Medición 150 RPM - Generador*  
Fuente: (Diseño por Romario Illera, Jonathan Mesa, Carlos Marin)



*Figura 18 Medición 300 RPM - Generador*

Fuente: (Diseño por Romario Illera, Jonathan Mesa, Carlos Marin)



*Figura 19 Medición 450 RPM - Generador*

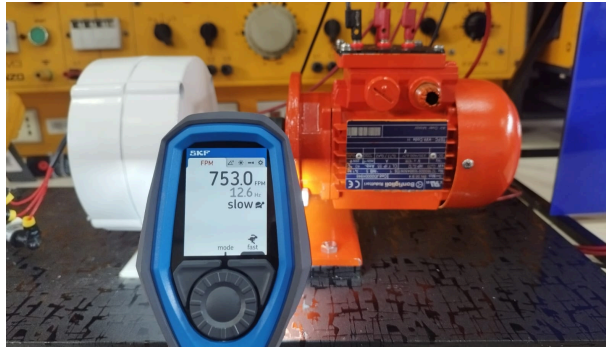
Fuente: (Diseño por Romario Illera, Jonathan Mesa, Carlos Marin)



*Figura 20 Medición 600 RPM - Generador*

Fuente: (Diseño por Romario Illera, Jonathan Mesa, Carlos Marin)





*Figura 21 Medición 750 RPM - Generador*

*Fuente: (Diseño por Romario Illera, Jonathan Mesa, Carlos Marin)*

- En cada escalón, se dejó estabilizar la operación durante un tiempo prudencial (aproximadamente 2 a 3 minutos) antes de realizar las lecturas.

- **Registro de variables eléctricas**

En cada nivel de velocidad angular, se midieron y registraron las siguientes magnitudes:

- Tensión (V)
- Frecuencia (Hz)
- Velocidad de rotación (rpm)

- Los datos se organizaron en tablas previamente diseñadas, lo que permitió un registro sistemático y ordenado.

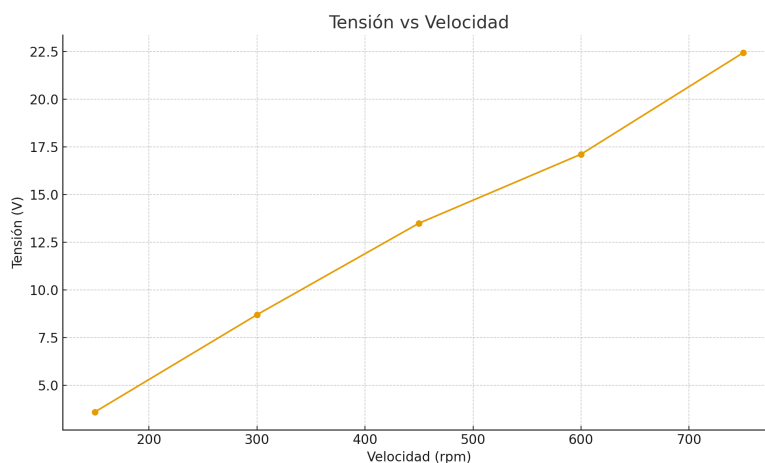
**Tabla 1. Prueba en vacío.**

| <b>Velocidad<br/>[rpm]</b> | <b>Tensión<br/>[V]</b> | <b>Frecuencia<br/>[Hz]</b> | <b>Observaciones</b>                                                                                                                                                                                                                               |
|----------------------------|------------------------|----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 150                        | 3.6                    | 15                         | El sistema muestra valores iniciales estables y un aumento proporcional entre tensión y frecuencia; sin embargo, la eficiencia es baja porque el generador aún no entra en su zona óptima de operación.                                            |
| 300                        | 8.70                   | 30                         | Se mantiene un comportamiento lineal con respecto al punto anterior, evidenciando un incremento normal de generación; en este rango la eficiencia mejora al disminuir la influencia relativa de pérdidas mecánicas y magnéticas.                   |
| 450                        | 13.5                   | 45                         | La relación tensión–frecuencia continúa siendo lineal, mostrando una respuesta estable del generador; este punto se acerca al rango medio donde la eficiencia aumenta gracias a una conversión electromagnética más favorable.                     |
| 600                        | 17.12                  | 60                         | Los valores crecen de forma progresiva y sin desviaciones; en este nivel la eficiencia es alta, ya que las pérdidas se estabilizan y el generador opera en una zona cercana a su rendimiento óptimo.                                               |
| 750                        | 22.44                  | 75                         | El generador mantiene un comportamiento adecuado y consistente en cuanto a tensión y frecuencia; la eficiencia se mantiene elevada, aunque pueden comenzar a incrementar pérdidas térmicas al acercarse al límite superior del rango de operación. |

- **Análisis de resultados**

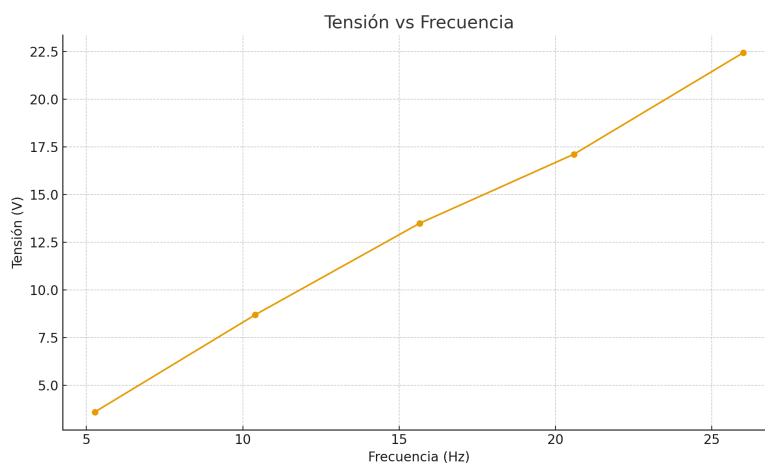
- Los valores obtenidos en cada etapa del ensayo fueron digitalizados en hojas de cálculo para construir las curvas características del generador en vacío. Se generaron tres gráficas fundamentales que permiten analizar el comportamiento eléctrico del sistema antes de la rectificación trifásica:

- **Curva de tensión vs. velocidad angular (Vacío)**



*Figura 22 Gráfica tensión vs. velocidad angular*  
 Fuente: (Diseño por Romario Illera, Jonathan Mesa, Carlos Marin)

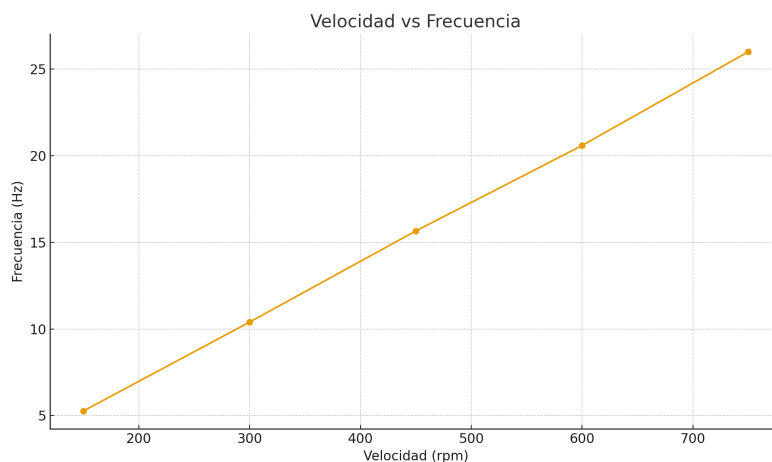
- **Curva de tensión vs. frecuencia**



*Figura 23 Gráfica tensión vs. frecuencia*  
 Fuente: (Diseño por Romario Illera, Jonathan Mesa, Carlos Marin)



### • Curva de velocidad angular vs. frecuencia



*Figura 24 Velocidad angular vs. frecuencia*  
 Fuente: (Diseño por Romario Illera, Jonathan Mesa, Carlos Marin)

Los resultados muestran que el generador presenta un comportamiento eléctrico y mecánico **altamente lineal y predecible** en vacío. Tanto la tensión como la frecuencia aumentan proporcionalmente con la velocidad, sin evidenciar saturaciones, inestabilidades ni puntos de quiebre.

- A velocidades cercanas a **550 rpm**, el generador cumple el requisito de generar **60 Hz**, confirmando su correcta relación constructiva entre polos y velocidad.
- La eficiencia mejora progresivamente con la velocidad, alcanzando un rendimiento sólido entre **600 y 750 rpm**.
- Las pérdidas en vacío se mantienen controladas y coherentes con los fenómenos físicos esperados (fricción, histéresis y corrientes parásitas).

Este análisis permite validar el diseño del sistema y sirve como base para futuros ensayos con carga, donde se evaluará la eficiencia real, la regulación de tensión y el comportamiento térmico bajo diferentes condiciones operativas.

- **Pruebas bajo carga:**

Las pruebas bajo carga se realizaron de manera escalonada, aplicando niveles del 2.5 %, 5.0 %, 7.5 % y 10 % de la capacidad nominal del generador. Para ello, se conectaron resistencias o bancos de carga adecuados, garantizando que cada escalón representa de forma proporcional la exigencia real de operación del equipo.

- **Metodología de la prueba de carga**

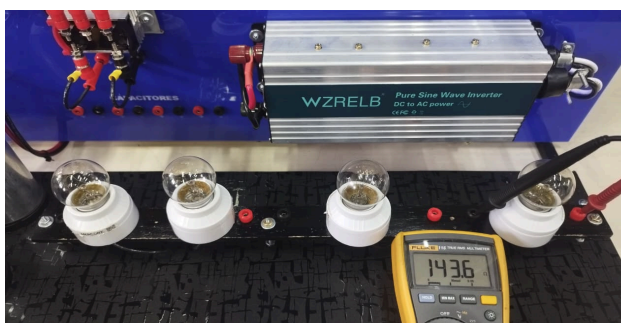
- **Preparación del sistema de generación**

- Se verificó previamente el estado operativo del generador, así como los sistemas de protección, control y medición.



*Figura 25 Verificación del módulo para prueba bajo carga*  
Fuente: (Diseño por Romario Illera, Jonathan Mesa, Carlos Marin)

- Se inspeccionó el banco de cargas, asegurando que sus resistencias y conexiones se encontraran en condiciones óptimas para soportar los diferentes escalones de carga.



*Figura 26 Verificación del banco de carga*  
Fuente: (Diseño por Romario Illera, Jonathan Mesa, Carlos Marin)

○ **Conexión y verificación inicial**

- El generador se puso en operación en vacío, comprobando que la tensión, frecuencia y velocidad (rpm) estuvieran dentro de los valores nominales.



*Figura 27 Verificación del módulo - valores nominales*

Fuente: (Diseño por Romario Illera, Jonathan Mesa, Carlos Marin)

- Se confirmó que los instrumentos de registro estuvieran calibrados para garantizar la validez de los datos obtenidos durante la prueba **bajo carga** del generador síncrono de imanes permanentes acoplado al motor de arrastre.

Para esta etapa se emplearon los siguientes instrumentos:

- **Tacómetro digital de contacto/no contacto:** utilizado para verificar la velocidad de giro del eje del motor y del generador, asegurando la correspondencia entre rpm y frecuencia generada.

- **Multímetro digital de precisión True RMS:** empleado para la medición de tensiones y corrientes trifásicas a la salida del generador de 24 V AC.
- **Osciloscopio digital de dos canales:** utilizado para la observación y verificación de la forma de onda antes y después de la rectificación.
- **Pinza amperimétrica True RMS:** empleada para la medición de corrientes en cada fase bajo diferentes niveles de carga.
- **Monitores de display multifunción (6 variables):** destinados al registro continuo de potencia activa, factor de potencia, tensión, corriente, frecuencia y consumo eléctrico acumulado durante la operación bajo carga.

Todos los instrumentos fueron contrastados con un **equipo patrón de calibración certificado**, corroborando que las lecturas se encontraban dentro de los márgenes de tolerancia establecidos. Esto aseguró la confiabilidad de los datos registrados durante la prueba bajo carga.

#### ○ **Aplicación escalonada de la carga**

- Se conectó carga de manera progresiva en porcentajes equivalentes al 2.5 %, 5.0 %, 7.5 % y 10 % de la potencia nominal del generador. Realizando comparación en tiempo real entre diferentes puntos de medida (generación trifásica 24VAC, rectificación y salida de inversor a 110 VAC).
- En cada escalón, se dejó estabilizar la operación durante un tiempo prudencial (aproximadamente 2 a 5 minutos) antes de realizar las lecturas.

○ **Registro de variables eléctricas**

En cada nivel de carga, se midieron y registraron las siguientes magnitudes para cada una de las etapas del módulo experimental:

- Tensión (V)
  - Corriente (A)
  - Frecuencia (Hz)
  - Potencia activa (W)
  - Factor de potencia ( $\cos \phi$ )
  - Velocidad de rotación (rpm)
- Los datos se organizaron en tablas previamente diseñadas, lo que permitió un registro sistemático y ordenado.

**Tabla 2. Prueba bajo carga escalonada para etapa de generación eléctrica.**

| % de carga | Velocidad [rpm] | Tensión [VAC] | Corriente [A] | Potencia [W] | Factor de potencia | Frecuencia [Hz] |
|------------|-----------------|---------------|---------------|--------------|--------------------|-----------------|
| 2.5 %      | 550             | 18.165        | 0.67          | 21.08        | 0.99               | 82              |
| 5.0 %      | 570             | 18.3          | 1.016         | 32.20        | 1                  | 83              |
| 7.5 %      | 700             | 20.6          | 1.25          | 44.60        | 0.98               | 81              |
| 10 %       | 750             | 21.3          | 1.60          | 59.02        | 1                  | 81              |

**Tabla 3. Prueba bajo carga escalonada para etapa de rectificación eléctrica.**

| % de carga | Tensión Rectificada [VDC] | Corriente [A] | Potencia [W] |
|------------|---------------------------|---------------|--------------|
| 2.5 %      | 23.5                      | 0.77          | 18.095       |
| 5.0 %      | 22.5                      | 1.25          | 28.12        |
| 7.5 %      | 24.8                      | 1.5           | 37.2         |
| 10 %       | 25.2                      | 1.99          | 50.148       |

**Tabla 4. Prueba bajo carga escalonada para etapa de inversor de onda pura.**

| % de carga | Tipo de carga<br>(Resistiva/Inductiva/<br>Capacitiva/Mixta) | Potencia<br>nominal de<br>carga (W) | Tensión<br>[VAC] | Corriente<br>[AC] | Potencia<br>consumo<br>[W] | FP   | Frecuencia<br>[Hz] |
|------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------|------------------|-------------------|----------------------------|------|--------------------|
| 2.5 %      | Resistiva                                                   | 15                                  | 121.9            | 0.78              | 10                         | 1    | 60                 |
| 5.0 %      | Resistiva                                                   | 30                                  | 122              | 0.15              | 20.5                       | 0.99 | 60                 |
| 7.5 %      | Resistiva                                                   | 45                                  | 122.2            | 0.24              | 30.6                       | 0.99 | 60                 |
| 10 %       | Resistiva                                                   | 60                                  | 122              | 0.34              | 42                         | 1    | 60                 |

- **Análisis de resultados**

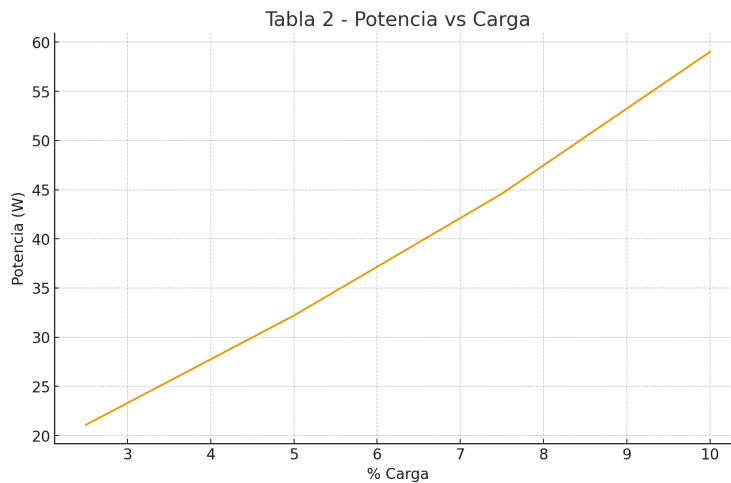
- Los valores obtenidos en las tres etapas del ensayo (generación, rectificación e inversión) fueron digitalizados y procesados para construir las curvas características del sistema **operando bajo carga incremental del 2.5 % al 10 %**. Este análisis permite evaluar el desempeño eléctrico completo del tren de conversión: generación AC → rectificación DC → inversión AC.

**Etapas de generación AC bajo carga:**

Las curvas de potencia, tensión, corriente y velocidad revelan un comportamiento **altamente estable y proporcional al incremento de carga**:

- La **potencia entregada** aumenta de forma lineal entre 21 W y 59 W, sin indicios de saturación magnética.
- La **velocidad del generador** aumenta ligeramente con la carga (550–750 rpm), indicando buena regulación mecánica.
- La **tensión AC** muestra una variación controlada, incrementándose de 18.1 V a 21.3 V.
- La **frecuencia** se mantiene entre 81–83 Hz, lo cual demuestra **estabilidad eléctrica incluso en carga media**.
- El **factor de potencia permanece cercano a 1**, reflejando que la carga impuesta es predominantemente resistiva y el generador trabaja en el punto óptimo.

- **Curva de generación Tabla 2 (Potencia vs. Carga)**



*Figura 28 Tabla 2 Potencia vs. Carga*

Fuente: (Diseño por Romario Illera, Jonathan Mesa, Carlos Marin)

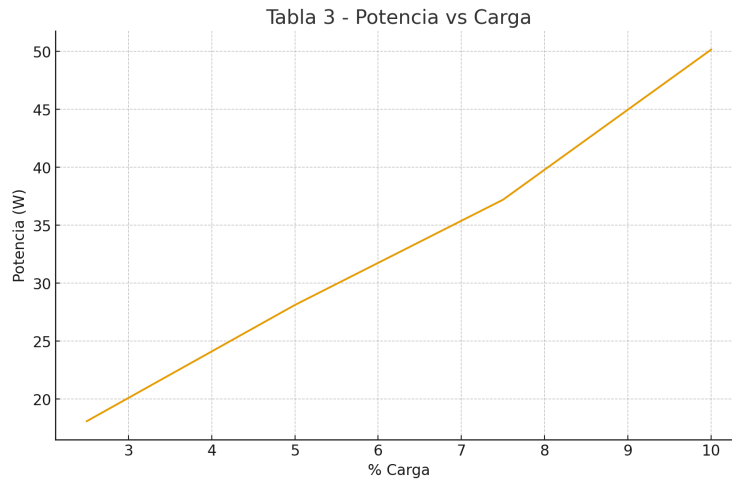
### **Etapas de rectificación DC:**

Los resultados de la etapa rectificadora muestran un comportamiento **estable y coherente con el incremento de carga:**

- La **tensión DC permanece controlada** (22.5 - 25.2 V), evidenciando buen filtrado y bajo rizado.
- La **corriente** aumenta proporcionalmente de 0.77 A a 1.99 A conforme crece la demanda.
- La **potencia rectificada** evoluciona desde 18 W hasta 50 W, sin distorsiones ni inestabilidades.



• **Curva de rectificación Tabla 3 (Potencia vs. Carga)**



*Figura 29 Tabla 3 Potencia vs. Carga*

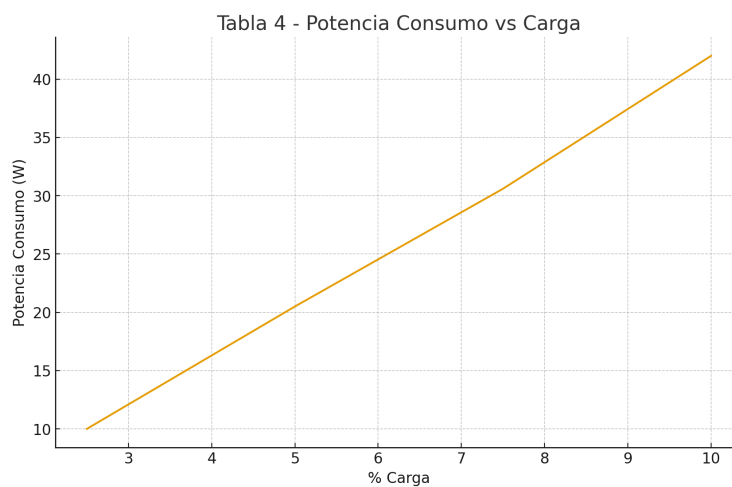
Fuente: (Diseño por Romario Illera, Jonathan Mesa, Carlos Marin)

**Etapas de inversor de onda pura:**

El inversor mantiene condiciones eléctricas **prácticamente ideales**, incluso con incrementos de carga:

- La **tensión AC de salida** permanece prácticamente constante (121.9 - 122.2 V).
- La **frecuencia se sostiene en 60 Hz** en todos los niveles de carga.
- El **factor de potencia es óptimo (0.99 - 1)**.
- La **potencia entregada** crece de 10 W a 42 W sin afectar la forma de onda, lo cual contiene una electrónica robusta.

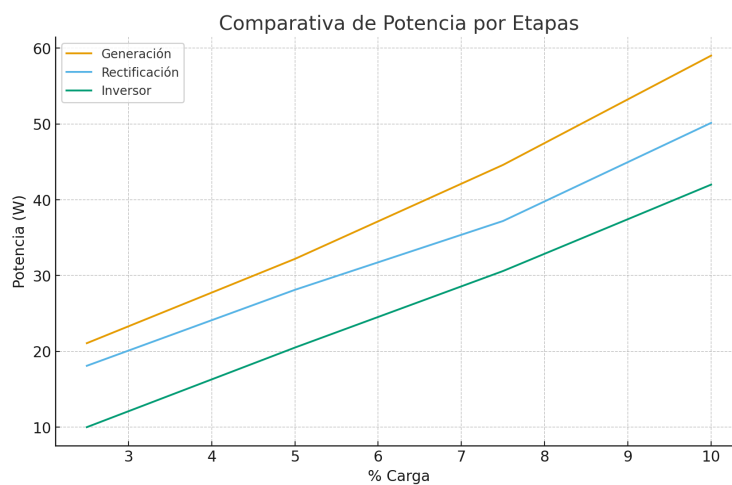
### Curva de rectificación Tabla 4 (Potencia vs. Carga)



*Figura 30 Tabla 4 Potencia vs. Carga*

Fuente: (Diseño por Romario Illera, Jonathan Mesa, Carlos Marin)

### Curva de potencia eléctrica (Generación - Rectificación - Inversor de onda)



*Figura 31 Potencia (Generación - Rectificación - Inversor de onda)*

Fuente: (Diseño por Romario Illera, Jonathan Mesa, Carlos Marin)

### 5.4 Método 3: Elaboración de guías y documentación técnica

En cumplimiento de los requerimientos de calidad definidos por la Institución Universitaria Pascual Bravo, se elaboró una guía de laboratorio bajo el formato institucional **GDO-GU-11**. Dicho formato contemplaba apartados específicos que aseguraban la coherencia y la estandarización del documento, los cuales fueron:

- Identificación de la práctica.
- Competencias a desarrollar.
- Fundamentación conceptual.
- Recursos requeridos para la ejecución.
- Procedimiento detallado para el desarrollo de la práctica.
- Criterios de evaluación del desempeño.
- Parámetros para la elaboración del informe.
- Bibliografía de referencia.

La guía de laboratorio fue complementada con un **anexo documental**, el cual no solo detalló cada uno de los apartados establecidos en el formato institucional, sino que además integró la información técnica de los equipos y componentes empleados en el desarrollo del proyecto. A partir de estos ítems, se construyó y se dejó como producto entregable la **Guía de laboratorio**, diseñada para orientar tanto a estudiantes como a docentes en el montaje, la operación y el análisis de los resultados experimentales.

Con el fin de garantizar la trazabilidad y el respaldo técnico, se anexaron las **fichas técnicas** de los equipos seleccionados, consolidando sus características eléctricas, mecánicas y de seguridad. Entre los elementos más relevantes se incluyeron:

- **Generador síncrono de imanes permanentes trifásico AVAN-400 W**: potencia nominal de 400 W, velocidad nominal de 550 rpm, clase de aislamiento F, nivel de protección IP55 y vida útil estimada mayor a 20 años

- **Cable multifilar FLEXIPLUS AWM calibre 10 AWG (Centelsa):** apto para 105 °C y 600 V, con ampacidad de 28 A y certificación RETIE  
Cable Multifilar Flexiplus AWM.
- **Osciloscopio portátil FNIRSI 1013D / 1013D Plus:** de 2 canales, 100 MHz de ancho de banda, 1 GSa/s de muestreo y pantalla TFT LCD de 7 pulgadas  
FNIRSI Osciloscopio 1013D Plus.
- **Medidor de energía eléctrica digital KWS-AC301L (8 en 1):** para medición de voltaje, corriente, potencia, energía, factor de potencia, frecuencia, temperatura y sincronización; rango de operación 50–300 V y 0–100 A.
- **Rectificador trifásico de puente (50 A / 1200 V):** módulo de aluminio de alta disipación térmica, con baja corriente de fuga inversa y alta eficiencia.
- **Variador de frecuencia (VFD) 2.2 kW – 3 HP:** entrada monofásica o trifásica a 220 V, salida trifásica de 0–400 Hz, 15 A, con control vectorial y funciones de protección y frenado.
- **Inversor de onda sinusoidal pura WZ RELB de 800 W:** entrada de 24 V CC y salida de 110–120 V CA, con dos salidas AC y pantalla LED

La integración de estas fichas técnicas permitió consolidar la base documental del proyecto, facilitando la validación de especificaciones y garantizando que los equipos seleccionados cumplieran con los criterios de calidad, seguridad y desempeño requeridos.

- **Planos de conexión eléctrica,** En los documentos anexos de la carpeta del proyecto se encuentran los planos de conexión eléctrica, que detallan la configuración del sistema y las interconexiones entre sus componentes.

## 5.5 Población y muestra.

La población objetivo de este proyecto está conformada por estudiantes y docentes de programas técnicos, tecnológicos e ingeniería en el área de electricidad y electromecánica de instituciones educativas que imparten formación en sistemas de generación eléctrica, control automático y energías renovables.

## 5.6 Instrumentos de recolección de información.

Para la recolección de información en este proyecto, se emplearon herramientas físicas y metodológicas que permitieron registrar, analizar y comparar las variables eléctricas generadas por el sistema experimental con generador de imán permanente. Los instrumentos utilizados fueron los siguientes:

**Multímetro digital:** Utilizado para realizar mediciones precisas de voltaje, corriente y resistencia en diferentes puntos del sistema. Permitió validar el comportamiento eléctrico básico del generador bajo distintas condiciones de carga.

**Monitor de redes trifásico (si aplica):** Empleado para monitorear y registrar parámetros eléctricos en tiempo real, incluyendo voltaje, corriente, potencia activa y reactiva, frecuencia y factor de potencia. Este equipo fue clave para evaluar el desempeño general del generador.

**Tacómetro digital:** Utilizado para medir la velocidad de rotación del generador, lo cual permite correlacionar la frecuencia y el voltaje generado con las RPM del eje.

**Hojas de registro y formatos de control:** Se emplearon formatos estructurados para documentar todas las mediciones realizadas en las distintas etapas de prueba. Esto permitió el análisis comparativo entre sesiones y la trazabilidad de los datos.

**5.6.1 Fuentes primarias:** En este proyecto se utilizaron como fuentes primarias manuales técnicos, hojas de datos de los componentes eléctricos utilizados (como generadores, monitores y equipos de medición), además de literatura académica enfocada en generación eléctrica y sistemas electromecánicos.

**5.6.2 Fuentes secundarias:** Las fuentes secundarias utilizadas incluyeron manuales de usuario, videos tutoriales y documentación técnica disponible en línea sobre montaje de generadores, conexiones eléctricas seguras y técnicas de medición eléctrica. Aunque no aportan teoría original, estas fuentes resultaron útiles para el desarrollo práctico del sistema. Se revisaron además blogs, foros especializados y páginas web de fabricantes de equipos de medición, que proporcionaron recomendaciones técnicas y procedimientos paso a paso sobre la instalación y operación de generadores pequeños y monitores eléctricos en entornos académicos. Estas fuentes secundarias complementaron los conocimientos adquiridos de las fuentes primarias, facilitando la implementación segura y eficiente del prototipo.

## 6. Resultados de la propuesta

Se validó experimentalmente el comportamiento del generador de imán permanente mediante la adquisición de mediciones en tiempo real de variables eléctricas y mecánicas, empleando instrumentos especializados como osciloscopio, multímetro, pinza amperimétrica AC–DC y tacómetro. Este proceso permitió caracterizar el desempeño del sistema en condiciones controladas de laboratorio y fortalecer las competencias prácticas en generación eléctrica de los estudiantes participantes.

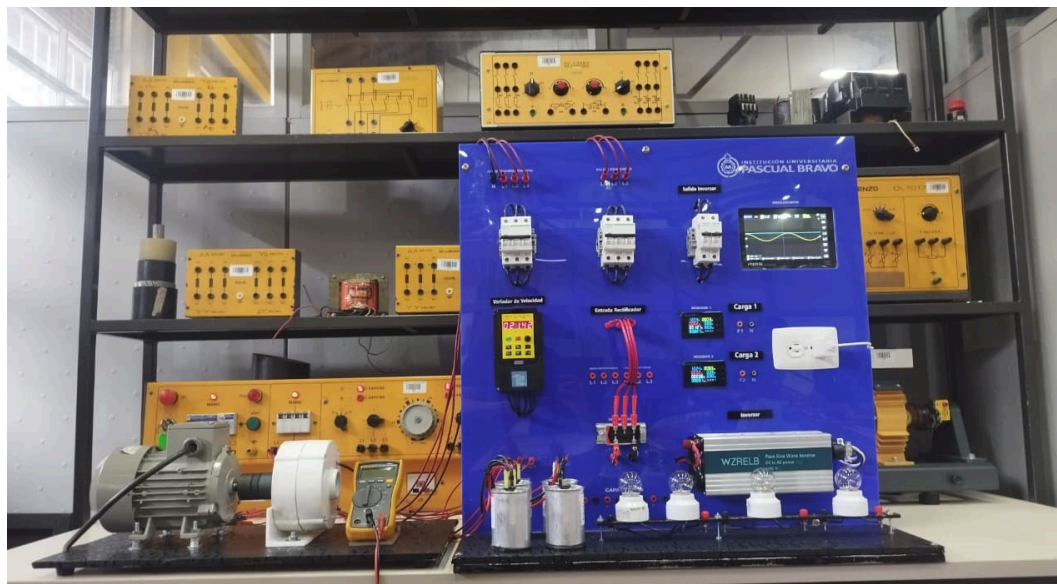
Como resultado del proyecto, el banco de pruebas quedó instalado de manera permanente en el Bloque 10, laboratorio salón 103 (con el motor y generador ubicados en el cuarto de entrega de equipos laboratoristas) de la Institución Universitaria Pascual Bravo. Su instalación garantizó la disponibilidad continua de un recurso académico destinado al desarrollo de actividades formativas y de investigación aplicada en tecnologías limpias.

Adicionalmente, se entregó la documentación técnica correspondiente, incluyendo:

- Fichas técnicas de los equipos utilizados,
- Plano eléctrico de conexión del módulo,
- Guía didáctica para la ejecución de prácticas de laboratorio.

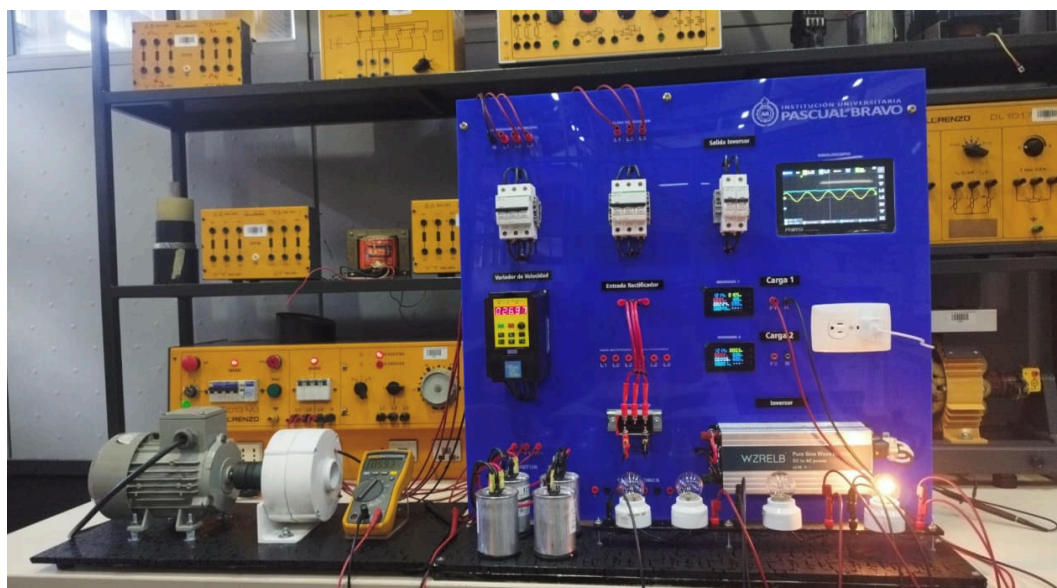
Con ello se aseguró la correcta operación del sistema y su continuidad como herramienta educativa al servicio de estudiantes, docentes y proyectos institucionales.

### Vista general del módulo completo



*Figura 32 Módulo (Generación - Rectificación - Inversor de onda)*  
Fuente: (Diseño por Romario Illera, Jonathan Mesa, Carlos Marin)

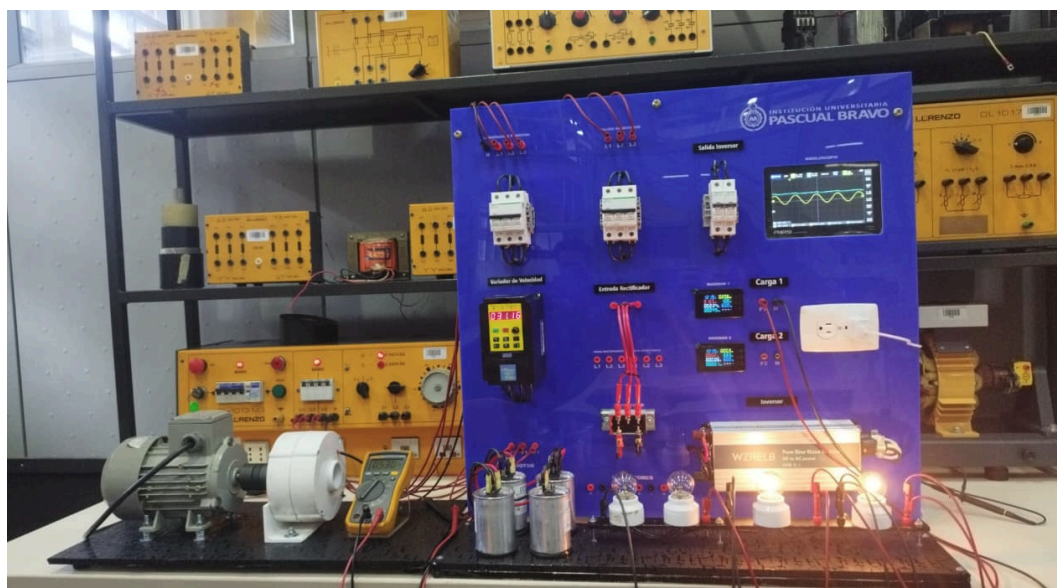
### Vista general - Prueba con una carga (2.5 %)



*Figura 33 Módulo Prueba con una carga (2.5 %)*  
Fuente: (Diseño por Romario Illera, Jonathan Mesa, Carlos Marin)

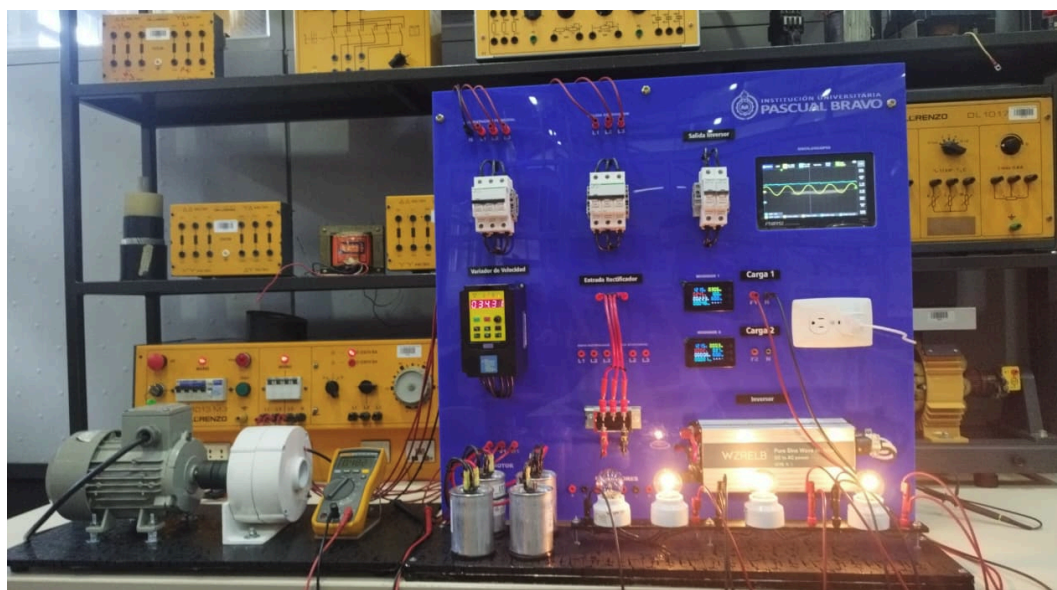


### Vista general - Prueba con una carga (5.0 %)



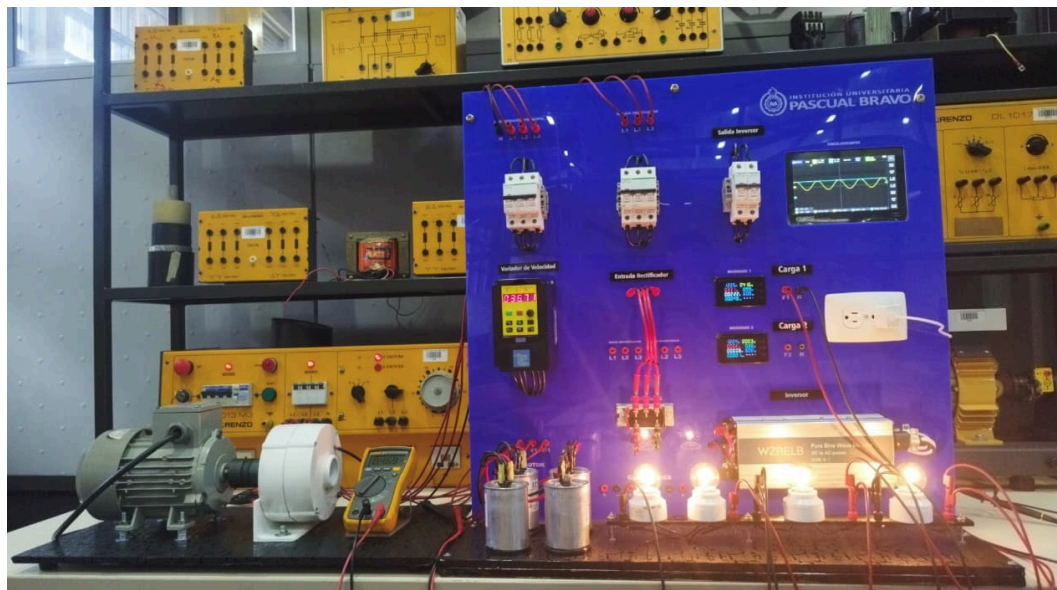
*Figura 34 Módulo Prueba con una carga (5.0 %)*  
Fuente: (Diseño por Romario Illera, Jonathan Mesa, Carlos Marin)

### Vista general - Prueba con una carga (7.5 %)



*Figura 35 Módulo Prueba con una carga (7.5 %)*  
Fuente: (Diseño por Romario Illera, Jonathan Mesa, Carlos Marin)

### Vista general - Prueba con una carga (10 %)



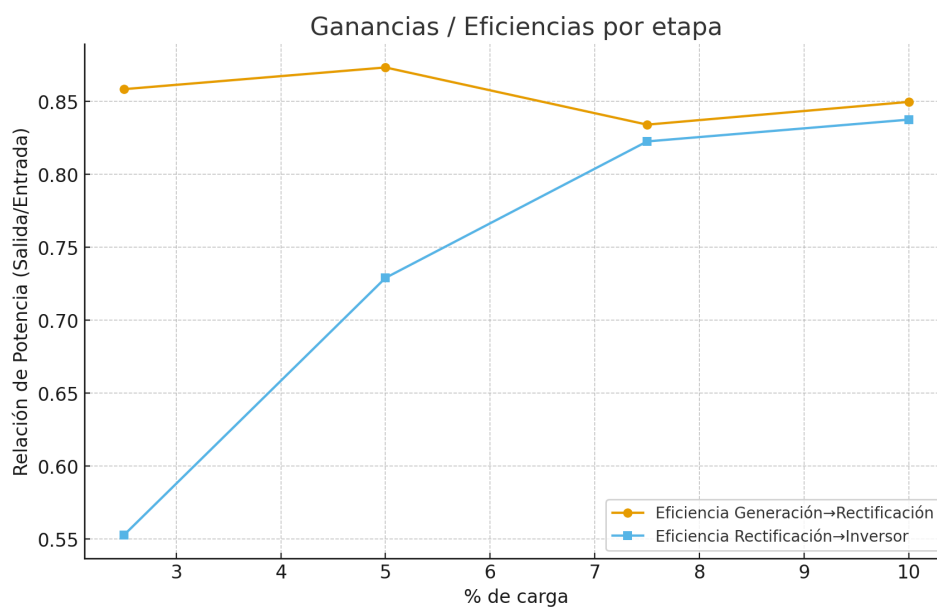
*Figura 36 Módulo Prueba con una carga (10 %)*  
Fuente: (Diseño por Romario Illera, Jonathan Mesa, Carlos Marin)

**Tabla 5. Medición de variables eléctricas bajo carga escalonada.**

| % de carga | Generación (AC): RPM / Vac (V) / I (A) / P (W) / FP / Hz | Rectificación (DC): Vdc (V) / I (A) / P (W) | Inversor (AC salida): Tipo / Pnom (W) / Vac (V) / I (A) / Pcons (W) / FP / Hz |
|------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| 2.5 %      | 550 rpm · 18.165 V / 0.67 A / 21.08 W / FP 0.99 / 82 Hz  | 23.5 V / 0.77 A / 18.095 W                  | Resistiva / 15 W / 121.9 V / 0.78 A / 10 W / FP 1 / 60 Hz                     |
| 5.0 %      | 570 rpm / 18.3 V / 1.016 A / 32.20 W / FP 1 / 83 Hz      | 22.5 V / 1.25 A / 28.12 W                   | Resistiva / 30 W / 122 V / 0.15 A / 20.5 W / FP 0.99 / 60 Hz                  |
| 7.5 %      | 700 rpm / 20.6 V / 1.25 A / 44.60 W / FP 0.98 / 81 Hz    | 24.8 V / 1.5 A / 37.2 W                     | Resistiva / 45 W / 122.2 V / 0.24 A / 30.6 W / FP 0.99 / 60 Hz                |

| % de carga | Generación (AC): RPM / Vac (V) / I (A) / P (W) / FP / Hz | Rectificación (DC): Vdc (V) / I (A) / P (W) | Inversor (AC salida): Tipo / Pnom (W) / Vac (V) / I (A) / Pcons (W) / FP / Hz |
|------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| 10 %       | 750 rpm / 21.3 V / 1.60 A / 59.02 W / FP 1 / 81 Hz       | 25.2 V / 1.99 A / 50.148 W                  | Resistiva / 60 W / 122 V / 0.34 A / 42 W / FP 1 / 60 Hz                       |

### Curva de Ganancias / eficiencias por etapa



*Figura 37 Ganancias / eficiencias por etapa*  
Fuente: (Diseño por Romario Illera, Jonathan Mesa, Carlos Marin)

**Tabla 6. Eficiencias y pérdidas por etapa.**

| % de carga | P <sub>gen</sub><br>(W) | P <sub>dc</sub><br>(W) | P <sub>out</sub><br>(W) | $\eta$<br>Generación→<br>DC | $\eta$<br>DC→AC | $\eta$<br>Global | Pérd.<br>Generación<br>(W) | Pérd.<br>Rectificación<br>(W) | Pérd.<br>Inversor<br>(W) |
|------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|-----------------------------|-----------------|------------------|----------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| 2.5 %      | 21.08                   | 18.095                 | 10                      | 85.9%                       | 55.2%           | 47.4%            | 3.0                        | 8.1                           | 0                        |
| 5.0 %      | 32.20                   | 28.12                  | 20.5                    | 87.3%                       | 72.9%           | 63.6%            | 4.1                        | 7.6                           | 0                        |
| 7.5 %      | 44.60                   | 37.20                  | 30.6                    | 83.4%                       | 82.3%           | 68.6%            | 7.4                        | 6.6                           | 0                        |
| 10 %       | 59.02                   | 50.148                 | 42                      | 84.9%                       | 83.7%           | 71.1%            | 8.9                        | 8.1                           | 0                        |

**Notas importantes:**

- La eficiencia global aumenta con la carga.
- Las mayores pérdidas se concentran entre generación y rectificación.
- Las pérdidas de generación aumentan con el % de carga debido a mayor esfuerzo mecánico y saturación parcial de flujo.
- La etapa de rectificación muestra mejoras hasta el 7.5%.
- La rectificación tiende a estabilizarse entre 5% y 10%.
- La rectificación es la etapa con más pérdidas relativas en cargas bajas.
- Se asume que el inversor entrega toda la potencia declarada como P<sub>cons</sub>, por eso la pérdida "inversor" está embebida en la diferencia DC–AC.
- El inversor es más eficiente a partir del 5%.
- La frecuencia de generación varía entre 81–83 Hz, pero el inversor siempre entrega 60 Hz, validando la calidad de salida.
- El sistema no presenta caída de tensión en carga, comportamiento adecuado del inversor.

## 7. Cronograma de actividades

Tabla 5

*Cronograma de actividades del trabajo de grado*

| Actividad                                        | Mes 1 | Mes 2s | Mes 3 | Mes 4 |
|--------------------------------------------------|-------|--------|-------|-------|
| - Investigación y análisis de imanes permanentes | x     | x      |       |       |
| - Diseño inicial del generador                   |       | x      |       |       |
| - Selección de materiales y componentes          |       | x      |       |       |
| - Construcción del prototipo                     |       |        | x     | x     |
| - Pruebas y ajustes del generador                |       |        | x     | x     |
| - Documentación final                            |       |        |       | x     |

Fuente. Diseño propio

## 8. Presupuesto

Tabla 6.

*Presupuesto del proyecto*

| Actividad                                                                                   | Unidad | Subtotal         |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|--------|------------------|
| Módulo Generador de Imán Permanente Educativo (con entradas y salidas)                      | 1      | 462.254          |
| Monitor de redes (para medir voltaje, corriente, frecuencia, potencia y factor de potencia) | 1      | 279.683          |
| VFD 2.2KW 3HP 220V                                                                          | 1      | 407.871          |
| Rectificador de puente                                                                      | 1      | 42.729           |
| WZ RELB Inversor de onda sinusoidal pura de 800 W, 24 V CC a 110 V 120 V CA                 | 1      | 310.759          |
| FNIRSI Osciloscopio 1013D Plus                                                              | 1      | 594.326          |
| Condensador 80 uF a 370 VAC                                                                 | 4      | 16.000           |
| Resistencias crespo bow 800W                                                                | 1      | 23.200           |
| Disyuntor 3 polos, 20 Amp 240 V/480 V CA                                                    | 2      | 70.000           |
| Disyuntor 2 polos, 20 Amp 120V/240V CA                                                      | 2      | 51.000           |
| Acople araña para eje de motor a eje del generador                                          | 1      | 100.000          |
| Soportes de montaje (para fijar las piezas)                                                 | 1      | 150.000          |
| Fungibles                                                                                   | 1      | 150.000          |
| Banco de trabajo didáctico                                                                  | 1      | 500.000          |
| Transporte                                                                                  | 1      | 50.000           |
| <b>Total</b>                                                                                |        | <b>3.376.822</b> |

Fuente. Diseño propio

Se extrae de la hoja presupuesto de la estructura de desglose del trabajo de grado

Nota: El presupuesto del proyecto será asumido por los integrantes del proyecto.

## 9. Bibliografía

Chapman, S. J. (2012). *MÁQUINAS*. C.P. 01376, México, D.F.:

McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.

Muñoz, R. (2008). Generalidades Sobre Imanes Permanentes y su . *Revista Instituto Nacional de Tecnología Industrial*, 47.

Murillo Julián, J. J. (2012). *Diseño de un Alternador de Flujo Axial con* . Zaragoza: Zaragoza.

Navarra Hervas, J. (2007). Curso de iniciación a la Energía Eólica y a los . *Revista de la Universidad de* , 60.