

BANCO DE PRUEBAS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE UN MOTOR  
BRUSHLESS DE UNA CICLA ELÉCTRICA

CARLOS ANDRÉS ACOSTA CORREA  
JUAN SEBASTIAN ROJAS DUARTE  
BRAYAN FERNEY RIVERA VÁSQUEZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA

2021

BANCO DE PRUEBAS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE UN MOTOR  
BRUSHLESS DE UNA CICLA ELÉCTRICA.

CARLOS ANDRÉS ACOSTA CORREA  
JUAN SEBASTIAN ROJAS DUARTE  
BRAYAN FERNEY RIVERA VÁSQUEZ

Trabajo de Grado para optar el Título de Ingenieros Electricistas

DIRECTOR  
JAIME GUILLERMO BARRERO PEREZ  
Magíster en Ingeniería Área de Electrónica

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA

2021

## DEDICATORIA

“Agradecemos profundamente a Dios y a nuestros Padres por su inmenso esfuerzo para poder formarnos como profesionales en una de las mejores universidades del país, a los profesores que nos enseñaron y nos exigieron al máximo en esta hermosa profesión y a nuestros compañeros de estudio.

Agradezco en especial a mi madre María Esperanza Correa y a mi padre Carlos Arturo Acosta quienes son los verdaderos autores de este inmenso logro que consigo en mi vida y obviamente van a ver muchos más y espero retribuirles o brindarles en un futuro no muy lejos todo su apoyo, dedicación, amor y paciencia.

Sé que la vida no es fácil, pero sé que con la ayuda de Dios vamos a llegar lejos en nuestra profesión También quiero dar las gracias a todos mis seres queridos y a mis compañeros de trabajo de grado Sebastián y Brayan porque sé que pronto tomaremos rumbos distintos pero algún día la vida nos reunirá en nuevos proyectos de trabajo”

**ANDRÉS**

Dedico este proyecto principalmente a Dios y a mis padres por apoyarme, aconsejarme y darme fuerzas para seguir adelante. Han sido el motor en el recorrido de este camino, motivándome para no bajar la guardia en diversas situaciones siendo mi apoyo incondicional durante el desarrollo de este trabajo.

A ellos y a mis seres queridos les dedico este trabajo que es el resultado de una historia contada con esfuerzo, la cual culminé con mucha entrega y corazón.

**SEBASTIÁN**

A la primera persona, que se lo quiero agradecer es a mi director Jaime Barrero, que sin su ayuda y conocimiento no hubiese sido posible realizar este proyecto.

A mis padres, por haberme proporcionado la mejor educación y lecciones de vida.

En especial a mi padre, por haberme enseñado que con esfuerzo, trabajo y constancia todo se consigue, y que en esta vida nadie regala nada.

En especial a mi madre, por cada día hacerme ver la vida de una forma diferente y confiar en mis decisiones.

A mis compañeros de clase, con los que he compartido grandes momentos.

A mis amigos, por estar siempre a mi lado.

A todos mis familiares, por su apoyo.

**BRAYAN**

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN .....	14
1. OBJETIVOS.....	15
1.1 OBJETIVO GENERAL .....	15
1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	15
2. MARCO TEORICO .....	16
2.1 MÁQUINA SÍNCRONA .....	16
2.2 TIPOS DE ARRANQUES.....	16
2.2.1 Arranque por frecuencia.....	17
2.2.2 Arranque por acople mecánico .....	17
2.2.3 Arranque por jaula de ardilla auxiliar.....	17
2.3 ASPECTOS CONSTRUCTIVOS MÁQUINA SÍNCRONA.....	18
2.4 MOTOR BRUSHLESS (SIN ESCOBILLAS) .....	20
2.4.1 Aspectos Constructivos <i>Brushless</i> .....	21
2.4.2 Motores Brushless Sensored (con sensor) .....	22
2.4.3 Motores <i>Brushless Sensorless</i> .....	23
2.4.4 Ventajas y Desventajas de un Motor Brushless.....	23
2.5 ALTERNADOR .....	25
2.5.1 Partes del alternador.....	25
3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL BANCO .....	29
3.1 ESPECIFICACIONES DE CADA ELEMENTO DEL BANCO.....	32
4. PRESUPUESTO.....	44
5. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO .....	45

5.1 PRUEBA N°1 MOTOR BRUSHLESS EN VACÍO (SIN ACOPLA AL ALTERNADOR) .....	45
5.2 PRUEBA N°2 BRUSHLESS ACOPLADO AL ALTERNADOR CON CARGA RESISTIVA DE 300Ω.....	47
5.3 PRUEBA N°3 BRUSHLESS ACOPLADO AL ALTERNADOR CON CARGA RESISTIVA DE 150Ω.....	52
5.4 PRUEBA N°4. GENERADOR BRUSHLESS EN VACÍO ACOPLADO AL ALTERNADOR .....	55
5.6 PRUEBA N°6 GENERADOR BRUSHLESS ACOPLADO AL ALTERNADOR CON CARGA DE 300Ω.....	58
5.5 PRUEBA N°5 GENERADOR BRUSHLESS ACOPLADO AL ALTERNADOR CON CARGA DE 150Ω.....	61
6. CONCLUSIONES .....	65
BIBLIOGRAFIA.....	67
ANEXOS.....	69

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Máquina síncrona de baja potencia con el inducido en el rotor .....	19
Figura 2. Tipos constructivos de máquinas síncronas .....	19
Figura 3. Tipos constructivos de máquinas brushless a) Rotor en la carcasa, b) rotor en el eje .....	22
Figura 4. Tabla Comparativa motores con y sin escobillas .....	24
Figura 5. Alternador .....	25
Figura 6. Partes del alternador.....	26
Figura 7. Controlador .....	27
Figura 8. Partes del controlador.....	28
Figura 9. Banco de pruebas.....	30
Figura 10. Relación entre velocidades angulares .....	31
Figura 11. Medidas de la estructura metálica .....	33
Figura 12. Cableado interno del banco .....	34
Figura 13. Brushless como motor, planta generador .....	34
Figura 14. Planta como motor, brushless generador .....	35
Figura 15. Máquinas motor <i>brushless</i> -alternador acopladas .....	36
Figura 16. Batería de plomo ácido.....	37
Figura 17. Configuración de rectificación.....	38
Figura 18. Puente rectificador KBPC5010 .....	39
Figura 19. Multímetro digital UNIT UT33C.....	40
Figura 20. Fototacómetro Dual digital laser. ....	41
Figura 21. Resistencias de 200 a 300 [ $\Omega$ ].....	42
Figura 22. Breakers IC60N 1P 4A y 32A. ....	43
Figura 23. Potencia de entrada motor brushless prueba N°1. ....	46
Figura 24. Corriente DC de la fuente en prueba N°1. ....	46
Figura 25. Tensión fase a fase en terminales del motor Brushless en prueba N°1. ....	47

Figura 26. Potencia de entrada motor Brushless en prueba N°2. ....	49
Figura 27. Corriente DC de la fuente en prueba N°2. ....	49
Figura 28. Tensión fase a fase en terminales del motor Brushless en prueba N°2. .....	50
Figura 29. Potencia entregada al alternador con carga 300 ohm .....	50
Figura 30. Conexiones para la prueba N° 2 y N° 5 .....	51
Figura 31. Potencia de entrada motor Brushless en prueba N°3. ....	53
Figura 32. Corriente DC de la fuente en prueba N°3. ....	54
Figura 33. Tensión fase a fase en terminales del motor Brushless en prueba N°3	54
Figura 34. Potencia entregada alternador con carga 150 Ω. ....	55
Figura 35. Tensión fase a fase en terminales del <i>Brushless</i> . ....	56
Figura 36. Tensión rectificadora del generador Brushless. ....	57
Figura 37. Potencia entrada alternador. ....	57
Figura 38. Datos medidos en el generador Brushless con carga de 300Ω. ....	58
Figura 39. Potencia entregada por el Brushless con carga 300Ω. ....	59
Figura 40. Tensión fase a fase en generador Brushless con carga 300Ω. ....	59
Figura 41. Corriente en la carga 300Ω. ....	60
Figura 42. Potencia de entrada del alternador .....	60
Figura 43. Potencia entregada por el Brushless con carga 150Ω. ....	62
Figura 44. Tensión fase a fase en generador <i>Brushless</i> con carga 150Ω. ....	62
Figura 45. Corriente en la carga 150Ω. ....	63
Figura 46. Potencia entrada del alternador .....	63
Figura 47. Conexiones para la prueba N° 5 y N° 6. ....	64

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características Máquina Brushless.....	21
Tabla 2. Características del alternador .....	26
Tabla 3. Especificaciones del brushless según la velocidad en laboratorio y en vacío. .....	35
Tabla 4. Especificaciones del fototacómetro Dual digital laser DT-2236C.....	41
Tabla 5. Presupuesto Banco de Motor Brushless .....	44
Tabla 6. Datos medidos en el motor Brushless.....	45
Tabla 7. Datos medidos de la prueba N°2 motor brushless -alternador.....	48
Tabla 8. Datos medidos de la prueba N°3 motor brushless -alternador.....	52
Tabla 9. Datos medidos en el generador Brushless. ....	55
Tabla 10. Datos medidos en el generador Brushless con carga de 150Ω. ....	61

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
ANEXO A. IDENTIFICACION DE LAS TERMINALES DE UN CONTROLADOR..	69
ANEXO B. MODULACIÓN POR ANCHO DE PULSO (PWM).....	71
ANEXO C. TOPOLOGÍA DEL INVERSOR .....	75

## RESUMEN

**TITULO:** BANCO DE PRUEBAS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE UN MOTOR BRUSHLESS DE UNA CICLA ELÉCTRICA\*

**AUTORES:** CARLOS ANDRÉS ACOSTA CORREA, JUAN SEBASTIAN ROJAS DUARTE, BRAYAN FERNEY RIVERA VÁSQUEZ\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Motor Brushless, Alternador, Controlador, Motor Síncrono, Generador síncrono, Inversor.

### DESCRIPCIÓN:

Los motores *Brushless* DC son muy utilizados hoy en día tanto para aplicaciones de uso comercial como para operaciones industriales debido a su tamaño compacto y alta eficiencia. La continua reducción en los costos de materiales magnéticos y dispositivos electrónicos, ha propiciado al uso masificado de estos, contribuyendo así el número de aplicaciones de alto nivel y potencia.

Este trabajo de grado se construyó un banco de pruebas para un motor *brushless* DC utilizado en bicicletas eléctricas con una potencia de 1000 [W] y acoplado a un alternador de la misma potencia por medio una correa de transmisión con la finalidad de poder estudiar variables como la velocidad [m/s], la tensión [V], la corriente [A], momento [N-m] y la potencia [W] variando su carga eléctrica por medio del alternador, esta máquina, también puede operar como motor para poder medir variables de tensión [V], corriente [A] y potencia [W] en el generador Brushless.

Una gran finalidad de este proyecto es caracterizar cualquier tipo de máquina Brushless, ya que es muy fácil de reemplazar este tipo de máquinas en el Banco de pruebas, para hallar posteriormente sus respectivas curvas de vacío y con carga en sus dos respectivas formas, como motor y como generador, luego obtener una gran cantidad de datos de corriente [A], tensión [V] y potencia [W] en su funcionamiento real.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Jaime Guillermo Barrero Perez. Magíster en Ingeniería Área de Electrónica.

## ABSTRACT

**TITLE:** PROOF BENCH FOR CHARACTERIZATION OF ELECTRICAL BRUSHLESS MOTOR IMPLEMENTED ON ELECTRICAL BIKES\*

**AUTHORS:** CARLOS ANDRÉS ACOSTA CORREA, JUAN SEBASTIAN ROJAS DUARTE, BRAYAN FERNEY RIVERA VÁSQUEZ\*\*

**KEY WORDS:** Brushless Motor, Alternator, Controller, Synchronous Generator, Synchronous Motor, Inverter.

### DESCRIPTION:

The Brushless Motors DC are very used today, as consumption applications as industrial operations, it is due to their compact size, their controllability and their high efficiency. The continuous reduction on magnetic material costs and electronic devices, it has contributed to increase the popularity of these, increasing the number of high level applications and power.

This Degree Project was implemented, the design and construction of proof bench for a Brushless Motor DC, which is used on electrical bikes with a power of 1000 [w] and coupled to a alternator of the same power through a transmission belt with the objective of studying some variables like the speed [m/s], the voltage [V], the current [A] and the power [W], changing his electrical charge through the alternator, of the same way was implemented the alternator like Motor for measuring the variables of voltage [V], current [A] and power [W] on Brushless Motor.

One great finality from this degree project is to characterize any kind of Brushless machine, since these machines are very easy to replace at the proof bench, to find later its respective vacuum and load curve in its two ways like motor and generator and finally to get a lot of data of current[A], voltage [V] and power [W] for its actual operation.

---

\* Bachelor Thesis

\*\* Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering. Director: Jaime Guillermo Barrero Perez. Master in Engineering Electronics Area.

## INTRODUCCIÓN

La Universidad Industrial de Santander y su escuela de ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones poseen un laboratorio de máquinas eléctricas para la formación de sus estudiantes, pero actualmente éste no cuenta con un banco para el estudio de máquinas tipo *Brushless*.

Con el desarrollo de este trabajo de grado, se busca que los estudiantes que hagan uso de este banco y se interesen más en afianzar sus conocimientos en este tipo de tecnologías modernas, aplicando sus conocimientos adquiridos en máquinas eléctricas I y II, generando nuevas ideas y nuevos proyectos para el futuro.

En este proyecto se implementó un banco de pruebas el cual consta de dos máquinas, una *brushless* utilizada en vehículos eléctricos y otra síncrona (alternador) usada en automóviles. Estas dos máquinas pueden trabajar, bien sea como motor o como generador las cuales están acopladas entre sí por una banda con una relación de velocidad  $r = 11$ .

Este banco facilita estudio de las máquinas de dos formas, cuando se conecta el *brushless* a trabajar como motor y el alternador está generando energía eléctrica. La otra forma es cuando el alternador va a trabajar como motor y el *Brushless* como generador.

Con la evolución de los motores a través del tiempo, se ha llegado al motor eléctrico brushless o sin escobillas y esto ha permitido su aplicación a las nuevas tecnologías de transporte eléctrico masivo y convencional.

## 1. OBJETIVOS

### 1.1 OBJETIVO GENERAL

Implementar un banco de pruebas para obtener ciertas características de un motor Brushless.

### 1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- ✓ Construir una estructura que permita fijar el motor Brushless y operarlo con diferentes velocidades y cargas de trabajo.
- ✓ Instrumentar el banco de pruebas para alimentar el motor por medio de una fuente de corriente continua y controlar su velocidad a través de un ESC (*electro speed controller*) y medir sus principales variables, velocidad de giro, tensión eléctrica y corriente.
- ✓ Realizar pruebas en vacío, con carga mecánica y eléctrica para obtener ciertas características del motor Brushless.

## 2. MARCO TEORICO

### 2.1 MÁQUINA SÍNCRONA

Es una maquina en donde la velocidad de rotación  $n$  (rpm) está vinculada a la frecuencia  $F$  de la red en la que se encuentra conectada y gira a la velocidad del sincronismo, esta característica permite que no exista deslizamiento entre la velocidad del campo magnético en el estator con respecto al rotor físico de la máquina, donde:

$$n_s = \frac{120 \times f}{P}$$

- $n_s$ = Velocidad Síncrona [Rpm]
- $f$ = Frecuencia de la Fuente de Alimentación [Hz]
- $P$ =Números de polos en el estator

Las maquinas sincrónicas como la mayoría de las maquinas electromecánicas rotativas, tienen la posibilidad de trabajar como motor y generador.

Cuando estas máquinas son empleadas como alternadores (generador síncrono) tienen diferentes aplicaciones, desde un generador en una planta hidroeléctrica, hasta una planta eléctrica Diésel, para tener energía en lugares donde no hay suministro de la red eléctrica.

Cuando son empleadas como motores síncronos, su aplicación es para lugares donde se necesite una transmisión de velocidad constante. Estas máquinas también permiten variar el factor de potencia y se pueden usar para compensar el consumo de potencia reactiva de la instalación en la cual se encuentran conectadas.

### 2.2 TIPOS DE ARRANQUES

**2.2.1 Arranque por frecuencia.** En este tipo de arranque la maquina está conectado a un variador de velocidad que se encarga de ir incrementado la frecuencia de modo que el rotor del motor empieza a girar siguiendo el campo magnético del estator y a medida que se va incrementado la frecuencia el rotor gira más rápido hasta llegar a la frecuencia de trabajo de la máquina, haciendo que rote a la velocidad del sincronismo. El motor *Brushless* que se implementó en este Banco tiene este tipo de arranque, ya que lo hace por medio del controlador el cual varía su frecuencia.

**2.2.2 Arranque por acople mecánico.** Es un tipo de arranque en el cual la máquina síncrona tiene que estar acoplada a otra, en la mayoría de los casos una máquina de corriente continua (shunt) ya que esta permite variar la velocidad, a través de este acople mecánico la Máquina Síncrona puede llegar a girar a una velocidad muy cercana a la del sincronismo. En este punto la Máquina Síncrona tiene que conectarse a una fuente de tensión trifásica, una vez enlazada la Máquina Síncrona a la fuente de tensión se procede a desconectar la máquina de corriente continua (shunt) de su fuente de alimentación para que está trabaje como un generador de C.C. (Corriente Continua) y la Máquina Síncrona como motor.

**2.2.3 Arranque por jaula de ardilla auxiliar.** Este arranque solo se produce en la Máquina Síncrona que tienen una jaula de ardilla auxiliar encima de los polos y es usada para arrancar este tipo de máquinas como motor de inducción, así mismo en este arranque el devanado de excitación se cierra con una resistencia óhmica cuya magnitud sea 10 a 15 veces superior a la propia ya que en el momento del arranque se generan tensiones muy elevadas, una vez el motor ha sido arrancado y llega a una velocidad cercana a la del sincronismo, en este punto se abre la jaula de ardilla auxiliar y se conecta una fuente de C.C. en la excitatriz para alimentarlo. En la actualidad este paso lo hace un controlador y en ese punto el motor se auto sincroniza, finalizada la operación de arranque se podrá regular la corriente de

excitación para variar el factor de potencia (FP) para compensar la potencia reactiva del circuito en el que está conectado.

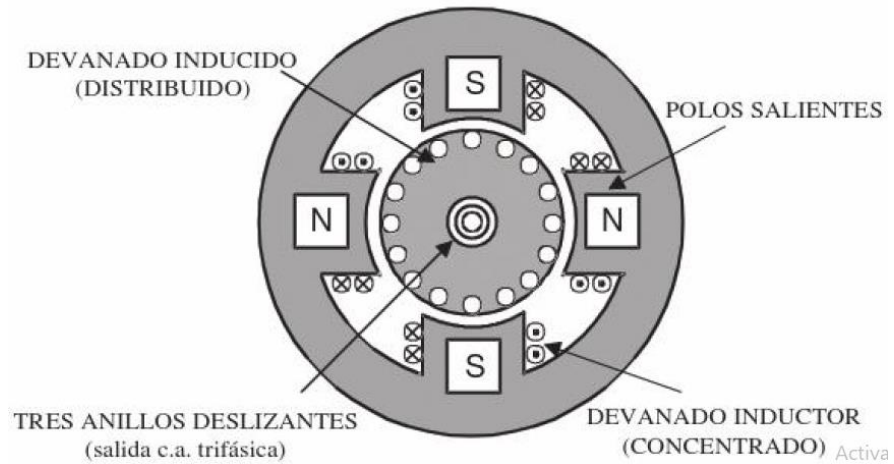
### **2.3 ASPECTOS CONSTRUCTIVOS MÁQUINA SÍNCRONA**

Las máquinas síncronas al igual que las demás máquinas eléctricas rotativas están construidas por devanados e imanes de neodimio, un devanado conocido como inductor y otro como inducido.

- Devanado Inductor: el cual está alimentado por corriente continua para generar un electroimán y así tener lo que conocemos como los polos de la máquina.
- Devanado inducido: es un arrollamiento el cual como su nombre lo indica induce una tensión trifásica.

Existen dos tipos de construcción para máquinas síncronas, cuando el devanado inducido C.A. (Corriente Alterna) está en el rotor o eje de la máquina y el devanado inductor (C.C.) se encuentra en el estator.

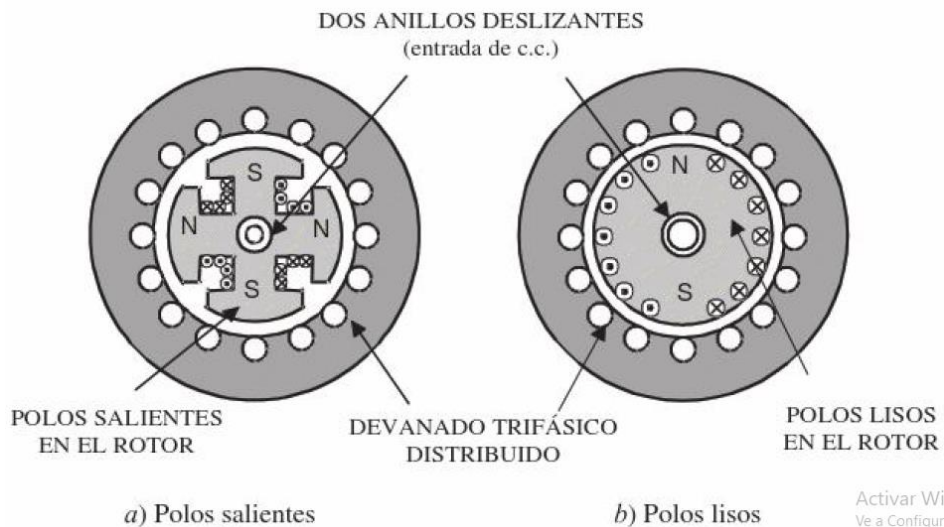
**Figura 1.** Máquina síncrona de baja potencia con el inducido en el rotor



Fuente: Diseño Fraile Mora

El otro tipo de construcción es cuando el devanado inductor (C.C) se encuentra en el eje o rotor de la máquina, En las máquinas *Brushless*, el devanado inductor es reemplazado por Imanes de Neodimio y el devanado inducido está en el estator (C.A).

**Figura 2.** Tipos constructivos de máquinas síncronas



Fuente: Diseño Fraile Mora

## 2.4 MOTOR BRUSHLESS (SIN ESCOBILLAS)

Esta máquina es libre de escobillas y de anillos rozantes ya que cuenta con imanes permanentes en su parte rotatoria (Ver Figura 3) esto se encargan de generar un campo magnético constante, al igual que la máquina síncrona tradicional cuenta con un devanado inducido que como su nombre lo indica se encarga de inducir una tensión eléctrica trifásica, la cual pasa directamente por los bobinados (parte fija de la máquina) y es suministrada por un controlador que al momento del arranque varía su frecuencia como se explicó anteriormente. El inductor de una máquina *brushless* son los imanes permanentes, estos tienden alinearse con el campo magnético creado por el devanado inducido (parte estática de la máquina), haciendo que los imanes sigan este campo y el rotor gire.

Para que el giro de la máquina continúe, en el momento que se va alinear la bobina energizada con el imán del rotor, esta se desactiva y se activa la siguiente bobina provocando que el campo magnético constante del rotor siga el otro campo variante en el tiempo generado por el estator.

Una de las características más importantes de este tipo de máquinas es que son prácticamente libres de mantenimiento periódico, y al no tener escobillas no existe ningún tipo de desgaste en los carbonillos que normalmente se usan en los motores tradicionales. En cuanto a la transferencia de energía, se tiene un aprovechamiento mayor por lo que no se presentan pérdidas de temperatura debido a la fricción entre escobillas y anillos rozantes.

Las características de la máquina *brushless* para este proyecto son las siguientes:

**Tabla 1. Características Máquina Brushless**

<b>Potencia nominal</b>	1000 W
<b>Tensión nominal</b>	48 V
<b>Posición</b>	Trasero del motor
<b>RPM</b>	100-380
<b>Par máximo</b>	32 Nm
<b>Eficiencia</b>	83%
<b>Eje</b>	100 mm(Front) / 135 mm (Trasero)
<b>Sensor Hall</b>	Sí

$\Omega = W = 10,47-39,8$  [rad/s], Velocidad angular

$I_N = 20,8$  [A], Corriente máxima consumida en el controlador

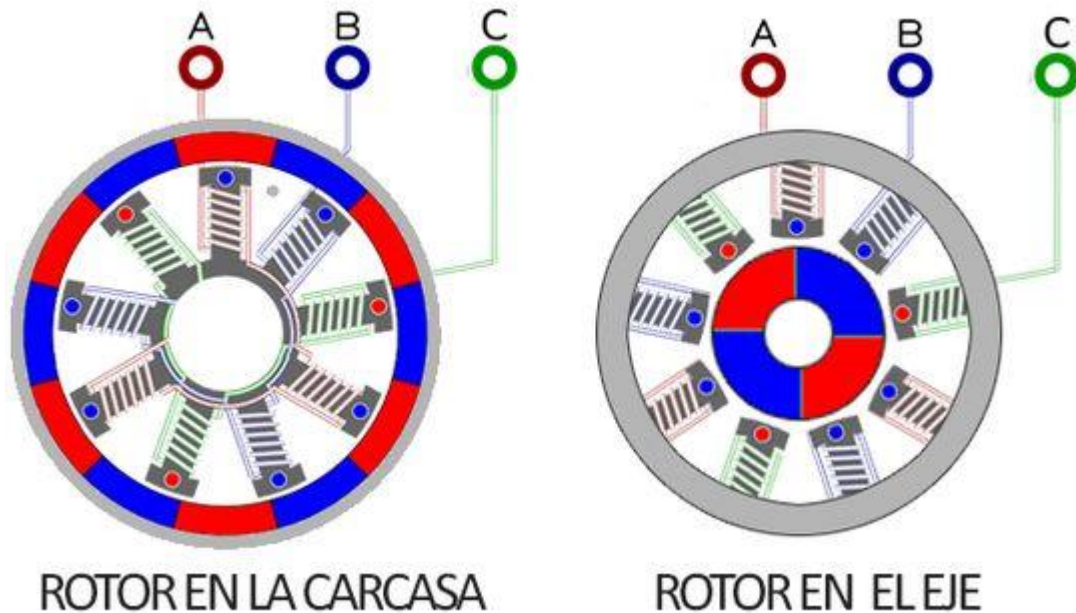
$M_n = 95-25$  N-m

$K_v=0.8$  unidades  $\frac{V}{S}$

**2.4.1 Aspectos Constructivos *Brushless*.** Respecto a su construcción estas máquinas se pueden encontrar con el estator situado en la parte exterior formando una carcasa y en el centro un rotor como en las máquinas rotativas tradicionales. Además, se pueden encontrar motores brushless con el inducido sobre el eje que permanece fijo, y en el exterior vemos la parte rotatoria (carcasa del motor eléctrico), este es el tipo de máquina que se implementó en el banco de pruebas de este proyecto (ver figura 3a). Este último caso lo podemos encontrar en las bicicletas o motos eléctricas, al tener esa cualidad se evita el uso de una transmisión mecánica como la que normalmente tienen las motocicletas de combustión.

Este tipo de motor al igual que la máquina síncrona funciona con dos tipos de campos magnéticos uno generado por corriente alterna en el estator o parte fija de la máquina y otro generado por los imanes permanentes en la parte móvil o rotor de la misma. En la siguiente figura se ilustra la construcción interna de este tipo de motor.

Figura 3. Tipos constructivos de máquinas brushless a) Rotor en la carcasa, b) rotor en el eje



Fuente: Luis Llamas. Ingeniería, informática y diseño. Publicado en 2020.

Otra clasificación de estos motores es por el tipo de funcionamiento, si este es asistido (Sensored) o no (Sensorless):

**2.4.2 Motores Brushless asistido o con sensor (Sensored).** Este tipo de máquinas emplean unos sensores en la parte interna del motor que son denominados “sensores de efecto hall” los cuales permiten que el controlador electrónico pueda reconocer la velocidad del rotor incluso cuando esta es muy baja, esto se logra a través de pulsos eléctricos proporcionales a la velocidad, que son enviados al variador como una señal de retorno para ajustar la tensión necesaria en las bobinas correspondientes, esto evita que en los motores brushless se presente lo que conocemos como deslizamiento, que es la diferencia entre la velocidad a la que debería girar con respecto a la que en realidad se mueve el motor. Esta característica permite obtener una eficiencia mucho más alta ya que la potencia siempre estará regulada de manera correcta. El motor *Brushless* que se implementó

en este proyecto de grado cuenta con este tipo de sensores, ya que se utilizan para mejorar la eficiencia de la máquina.

**2.4.3 Motores *Brushless no asistido o sin sensor (Sensorless)*.** En cuanto a sus aspectos constructivos es una máquina igual a la “*Brushless Sensored*”, pero como su nombre lo dice, sin el sistema de sensores de retorno al controlador. Su explicación es, cuando el controlador produce el giro de motor como se describió anteriormente enviando la tensión necesaria a las bobinas correspondientes del motor. El problema es que no tiene la precisión necesaria y a bajas velocidades causa deslizamiento, haciendo que haya pérdidas de potencia en el sistema.

**2.4.4 Ventajas y Desventajas de un Motor Brushless.** El motor Brushless se caracteriza por tener una gran ventaja al ser más eficiente y consumir menos energía eléctrica, esto acompañado de su tamaño inferior con respecto a los demás, permite más aplicaciones y usos en la industria.

Esta máquina al no tener escobillas, facilita su rotación porque gira sin fricción y sin pérdidas de corriente eléctrica menos corriente eléctrica que un motor convencional.

Estos mantienen una temperatura adecuada, gracias a que tienen una mejor disipación de calor, porque evitan la fricción de piezas y no requieren de un mantenimiento constante.

Su precio es una desventaja, ya que en la actualidad son costosos, pero a largo plazo estos poseen una vida útil más larga

Figura 4. Tabla Comparativa motores con y sin escobillas

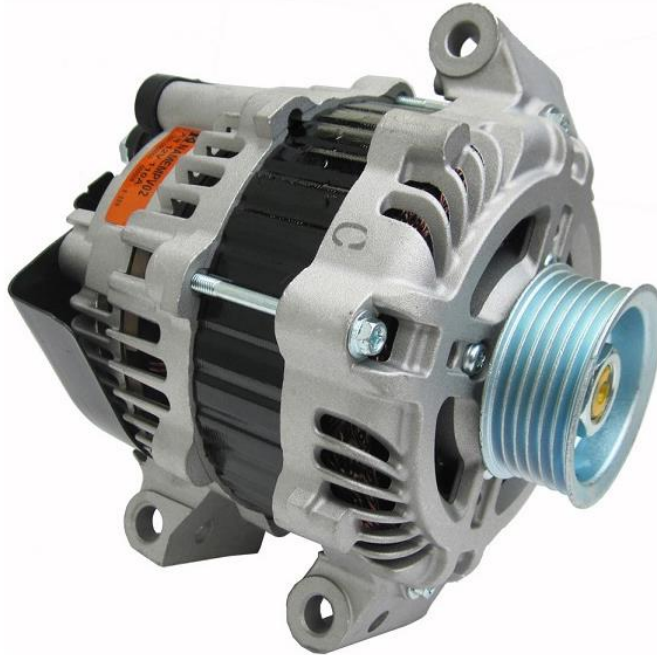
	<b>Motor BLDC</b>	<b>Motor con escobillas</b>
Commutación	Commutación electrónica basada en sensores de posición de efecto Hall	Commutación por escobillas
Mantenimiento	Mínimo	Periódico
Durabilidad	Mayor	Menor
Curva Velocidad / par	Plana. Operación a todas las velocidades con la carga definida	Moderada. A altas velocidades la fricción de las escobillas se incrementa, reduciendo el par.
Eficiencia	Alta. Sin caída de tensión por las escobillas.	Moderada
Potencia de salida / Tamaño	Alta. Menor tamaño debido a mejores características térmicas porque los bobinados están en el estator, que al estar en la carcasa tiene una mejor disipación de calor.	Baja. El calor producido en la armadura es disipado en el interior aumentando la temperatura y limitando las características.
Inercia del rotor	Baja. Debido a los imanes permanentes en el rotor	Alta. Limita las características dinámicas.
Rango de velocidad	Alto. Sin limitaciones mecánicas impuestas por escobillas/commutador.	Bajo. El límite lo imponen principalmente las escobillas.
Ruido eléctrico generado	Bajo	Arco en las escobillas
Coste de construcción	Alto. Debido a los imanes permanentes	Bajo.
Control	Complejo y caro	Simple y barato.
Requisitos de control	Un controlador es requerido siempre para mantener el motor funcionando. El mismo puede usarse para variar la velocidad.	No se requiere control si no se requiere una variación de velocidad.

Fuente: Motor Brushless (Sin Escobillas). Características Fundamentales. Universidad Politécnica de Cartagena.

## 2.5 ALTERNADOR

El alternador es el segundo elemento del proyecto que tiene como misión transformar la energía mecánica producida por el *brushless* en energía eléctrica.

**Figura 5.** Alternador



Fuente: Mercado libre

### 2.5.1 Partes del alternador

**Inductor:** Es la parte móvil del alternador, está formada por un electroimán que recibe corriente desde el regulador a través de unos anillos rozantes situados en el eje. Este electroimán produce un campo magnético, ante el cual, reaccionan las bobinas del estator (parte fija) generando corriente eléctrica. A.C.

**Estator (inducido):** Es la parte fija sobre la que se encuentra el bobinado trifásico, puede estar constituido en estrella o en triángulo.

**Puente rectificador de diodos:** Es el elemento encargado de rectificar la tensión de salida del alternador (ya que ésta es alterna) haciendo que se convierta en continua. (Figura 6. Placa de Diodos)

**Polea:** Es la que recibe la fuerza mecánica procedente del motor *brushless* a través de una correa plana. Esta polea va unida al eje del alternador y se encarga de mover el rotor que hay en su interior.

**Figura 6.** Partes del alternador



Fuente: <https://caymansseo.com/que-es-como-funciona-un-alternador>

Las características de la máquina síncrona (alternador) adquirida para este proyecto son las siguientes:

**Tabla 2.** Características del alternador

<b>Potencia</b>	1000[W]
<b>Corriente de carga</b>	75[A]
<b>Tensión de salida</b>	14[V]
<b>Diámetro polea</b>	5,45 [mm]
<b>Tensión excitatriz</b>	12[V]
<b>RPM</b>	4673,32
<b><math>\Omega</math></b>	489,38 [rad/s]

## Controlador

Este dispositivo es el encargado de alimentar el motor Brushless de 1000 [W] y regular su velocidad, se puede decir que es el encargado de transformar la corriente directa de 48 [V] y por medio de un inversor interno se consigue una salida trifásica en AC para alimentar el motor Brushless, regulando su velocidad por medio de la frecuencia.

**Figura 7.** Controlador



Especificaciones:

- Tensión nominal: 48 [V]
- Corriente nominal: 11[A]
- Corriente máxima: 22 ±1[A]
- Protección de alto voltaje: DC 40 ±0.5[V]
- Entrada de freno: Nivel bajo DC40 ±0.5 [V]
- Modelo: KT48ZWSRM-LCD

Figura 8. Partes del controlador



Fuente:

### 3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL BANCO

Teniendo en cuenta la naturaleza de este proyecto, se recopiló información sobre bancos de prueba anteriormente hechos en diferentes ramas, para así tener una gran fuente de información, de la cual se pudo escoger lo más apto para nuestro diseño inicial y empezar a darle forma según el orden de nuestros elementos.

Inicialmente se observaron ventajas y desventajas que ofrecen innumerables prototipos para prácticas de laboratorios con máquinas rotativas, entonces se procedió hacer un diseño inicial en *SOLIDWORK* (software licenciado por la universidad) de esta manera establecer las medidas y un enfoque más real de lo que se hizo.

Es de vital importancia hacer un análisis de datos de la información recopilada y seleccionada para las funciones de nuestros elementos a instalar para poder ofrecer unos equipos totalmente práctico y didáctico, para poder afianzar conocimientos adquiridos en este tipo de máquinas eléctricas modernas.

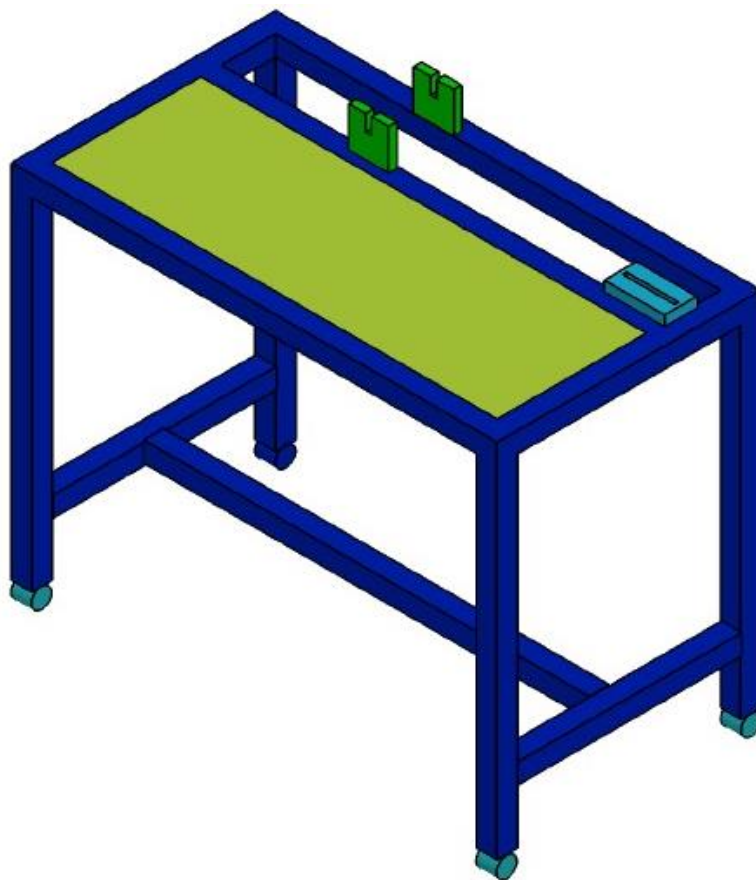
Este proyecto cuenta con los elementos necesarios para desarrollar prácticas en él cómo generación, conexiones y mediciones.

Para la realización inicial de esta construcción, se propuso hacer un diseño con medidas de una estructura de mesa de trabajo a una altura adecuada para un uso cómodo y los espacios suficientes para la instalación de las máquinas eléctricas, las borneras y los demás elementos están ubicados de tal manera que facilite las distintas conexiones para la realización de las pruebas. Hacer un diseño en un software de dibujo especializado (*SOLIDWORK*), permitió ajustar las medidas iniciales requeridas y la distribución correcta de los componentes más grandes del

banco como las máquinas eléctricas (*brushless* y alternador), tablero y mesa de trabajo.

Para su construcción inicial se contó con personal en el área de metal mecánica, esto es debido a la construcción de la estructura en este material como corte de tubos y láminas, soldadura y acabados industriales.

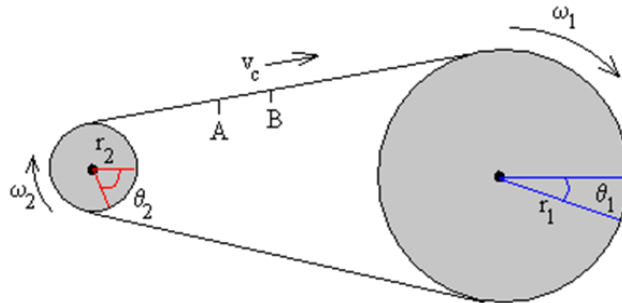
**Figura 9.** Banco de pruebas



**Cálculo del Acople *Brushless*-Alternador.**

En este caso para el Banco se representa La figura de la llanta de la bicicleta y el acople del alternador unidos mediante una correa de transmisión y se procede a calcular el radio del acople.

**Figura 10.** Relación entre velocidades angulares



La velocidad  $V_c$ , es la velocidad de la correa que es la misma velocidad de cualquier punto sobre la llanta

RPM alternador / RPM *brushless* = 4673,32 / 410,8 = 11,37 entonces....

$$V_c = \omega_1 \times r_1 = \omega_2 \times r_2$$

- El radio de la llanta,  $r_1 = 31$  [cm]
- El radio polea planta,  $r_2 = 2,725$  [cm]

$r_1/r_2$  entonces  $r = 11$

En el tiempo  $t$  un tramo de la correa se mueve del punto A al B. Un punto de la llanta en la superficie gira un ángulo  $\theta_1$  y uno de la superficie del acople gira un ángulo  $\theta_2$ . Tendremos entonces la siguiente relación.

$$\theta_1 \times r_1 = \theta_2 \times r_2 \quad \text{Ecuación para relacionar velocidad tangenciales de llanta y Acople.}$$

**Cálculos:**

- El radio de la llanta,  $r_1 = 31$  [cm]
- El radio polea planta,  $r_2 = 2,725$  [cm]
- Velocidad angular de la llanta,  $\omega_1 = 43,01$  [rad/s], esto es equivalente a 410,8 [rpm] por supuesto esta medida se tomó con un fototacómetro Laser.

Aplicando la ecuación anterior mencionada:

$$w_1 \times r_1 = w_2 \times r_2 \quad \text{Velocidad de cicla 48 [Km/h] o 13,33 [m/s]}$$

Motor Brushless=410.8 [rpm]

Reemplazando valores:

$$31 \times 410,8 = w_2 \times 2,725$$

$$w_2 = \frac{31 \times 410,8}{2,725} = 4673,32 [r.p.m.]$$

### **3.1 ESPECIFICACIONES DE CADA ELEMENTO DEL BANCO**

El banco está compuesto por una serie de elementos que en conjunto aportan seguridad y funcionalidad. Principalmente se tienen en cuenta estas dos características, ya que una de las razones para ejecutar este proyecto es evitar riesgos de montaje al realizar las conexiones entre las máquinas y el tablero.

Para lograr el objetivo de obtener un banco de pruebas seguro, se divide en 3 grupos y cada componente con una función específica:

1. Estructura metálica
2. Tablero
3. Máquinas rotativas.

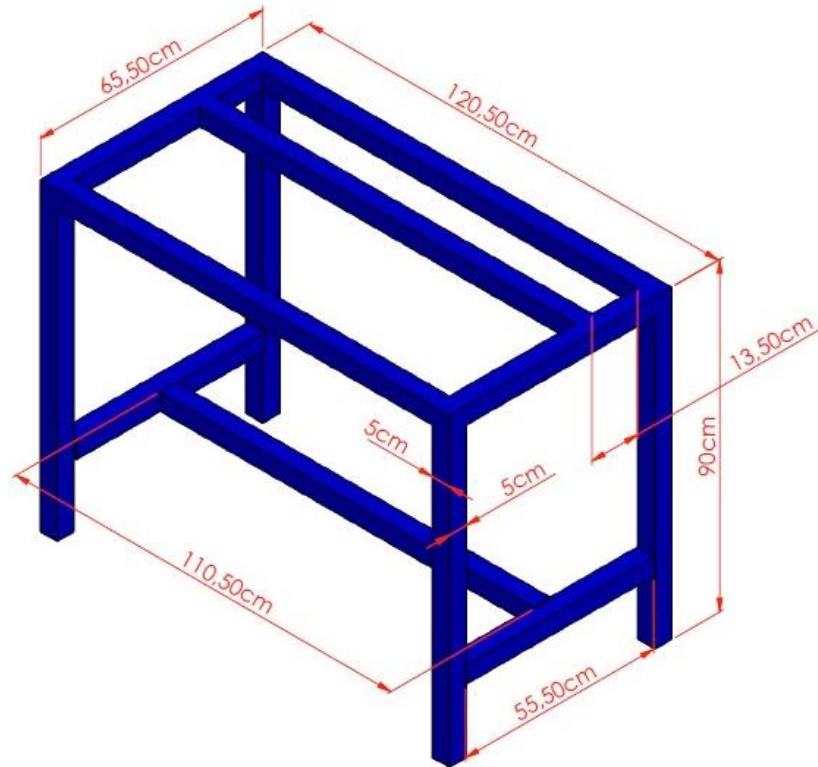
#### **Estructura Metálica**

Esta debe aguantar todo el conjunto de elementos que lo conforman además de los esfuerzos a los que estará sometido normalmente durante su uso. Está compuesta por barras robustas longitudinales y transversales soldadas entre sí, con el fin de obtener una base sólida, consistente y duradera.

La estructura está formada por una aleación metálica, la cual ofrece unas características esenciales para la construcción del banco debido a los efectos de compresión, tensión y resistencia con el fin de no fragilizar la estructura.

Aunque todas las uniones de las diferentes barras se encuentran soldadas, una pequeña parte del banco está diseñada para el desplazamiento de una de las maquinas (alternador), que a su vez es ajustable con tuercas y tornillos a la medida necesaria para poder tensionar la banda que lo une con el motor.

**Figura 11.** Medidas de la estructura metálica



### **Tablero**

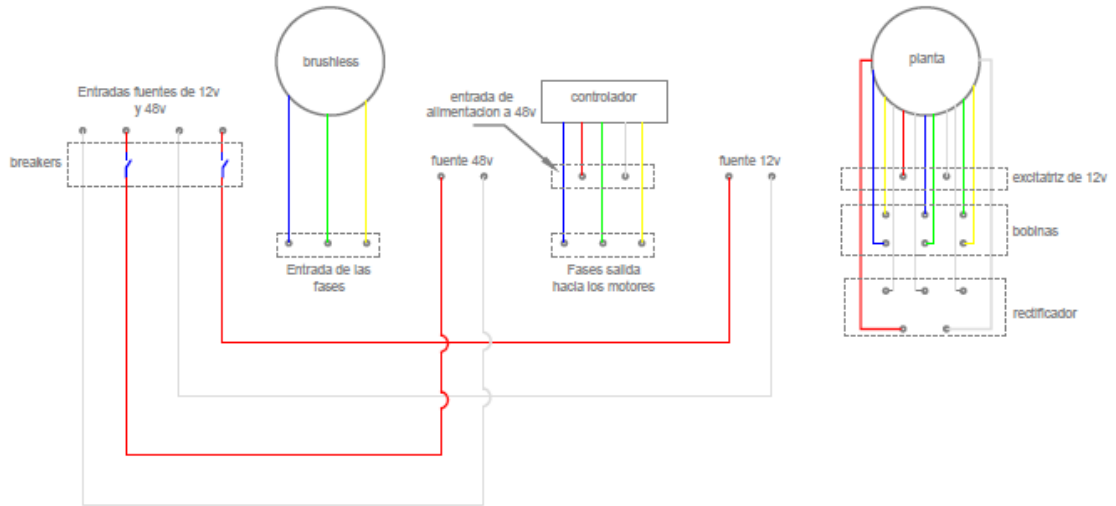
Es una de las partes detalladas del banco, puesto que en él van organizados los distintos tipos de conexión que se establecen para trabajar el motor brushless y así poder tomar las respectivas mediciones de las máquinas durante las pruebas. Lo anteriormente explicado necesita de algunos elementos instalados para hacer posibles estos escenarios como lo son borneras, medidores y controlador.

Criterios de selección:

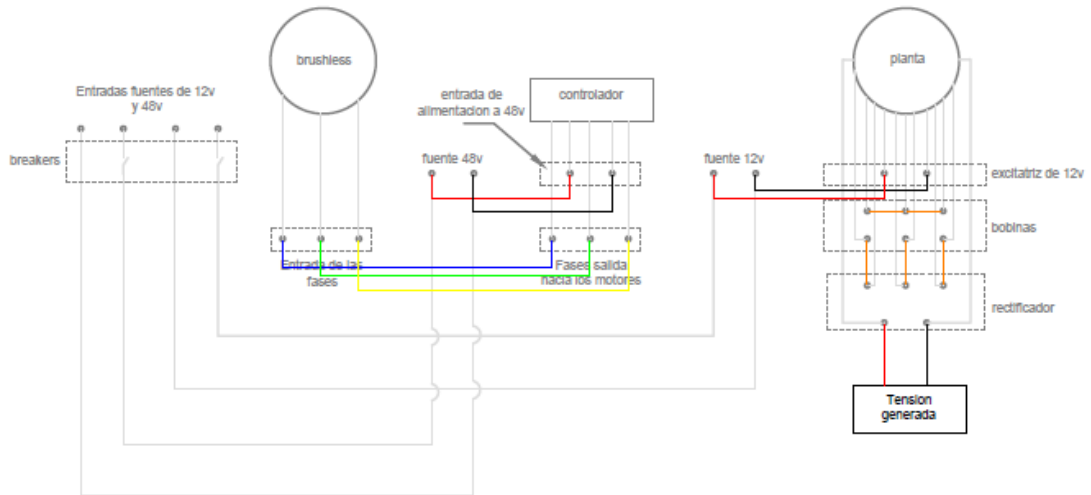
- Manejo de espacios para mayor comodidad a la hora de trabajar.
- Materiales económicos y duraderos.

- Sencillo y práctico para modificaciones posteriores.
- Señalización de comprensión rápida.

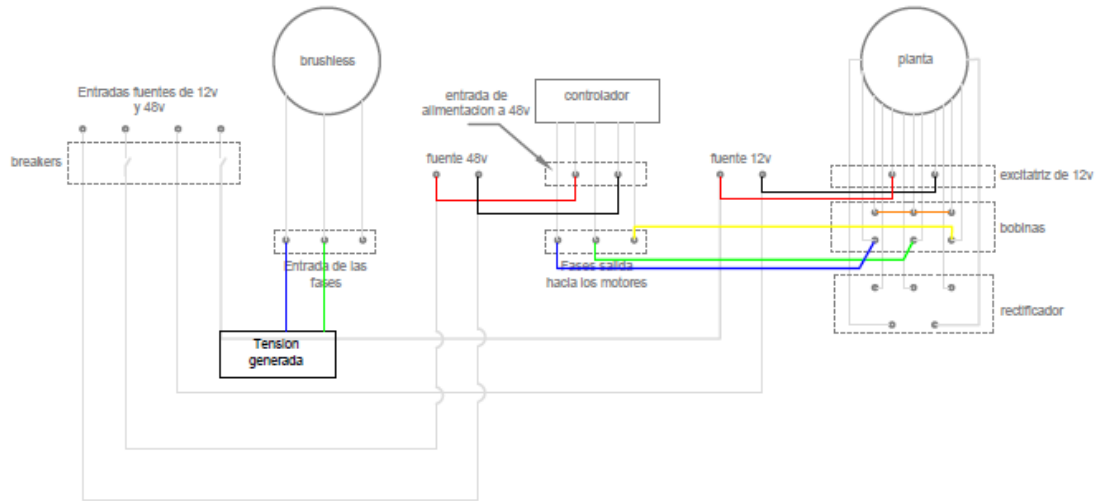
**Figura 12.** Cableado interno del banco



**Figura 13.** Brushless como motor, planta generador



**Figura 14.** Planta como motor, brushless generador



Esta parte del banco está formada por una tabla de madera, cuyas características principales pueden otorgar rigidez, durabilidad y confianza a la hora de trabajar sobre ella, ya que se encuentra sostenida mediante unas escuadras metálicas soldadas a su vez a la base del banco, adicionalmente está ensamblada mediante tornillos para una mayor seguridad.

**Tabla 3.** Especificaciones del brushless según la velocidad en laboratorio y en vacío.

Tipo velocidad	Magnitud
Rpm	410.8
$\Omega$	43.01 [rad/s]
$V_{tangencial}$	13.33 [m/s]
$V_{lineal}$	47.9[km/h]

### Máquinas rotativas

En el banco se implementaron dos máquinas de la misma potencia acopladas entre sí, las cuales trabajan de modo diferente, una como motor y la otra como generador para medir tensión, corriente y potencia en las cargas eléctricas que se implementarán como elementos externos al banco.

Su posición en la estructura metálica (alternador), se puede graduar linealmente para luego ser tensionado con el motor mediante una banda y una polea. Este alternador tiene una salida de tensión rectificada, dando una mejor toma de datos a la hora de realizar las pruebas.

**Figura 15.** Máquinas motor *brushless*-alternador acopladas



### **Fuentes de energía**

Para el funcionamiento del motor *Brushless* se requiere una fuente de energía de (48 VDC, 10 A). En la actualidad estas fuentes de poder o de alimentación son los dispositivos que se encargan de transformar la corriente alterna que se encuentra en los domicilios (110 V o 220 V) en corriente continua; utilizada en los diferentes dispositivos electrónicos suministrando diferentes voltajes requeridos por sus componentes, incluyendo protecciones para sobretensiones.

La fuente utilizada para el arranque del motor brushless, es una fuente “switchheada” lineal que con ayuda de un transformador reduce la tensión, rectificando el voltaje alterno a onda completa que luego es filtrada para convertirla en continua y por

ultimo regular la tensión manteniendo el voltaje de salida ante variaciones de la carga.

Para la alimentación del alternador, fue necesaria una batería de plomo ácido que comúnmente son utilizadas en los automóviles, ya que puede suministrar corrientes grandes, lo que la hace ideal para el arranque de motores. Ésta batería está formada por un depósito de ácido sulfúrico que a su vez tiene un conjunto de placas de plomo paralelas entre sí, alternadas dependiendo de su polaridad.

**Figura 16.** Batería de plomo ácido.



Fuente: Mercado libre

Características de la batería:

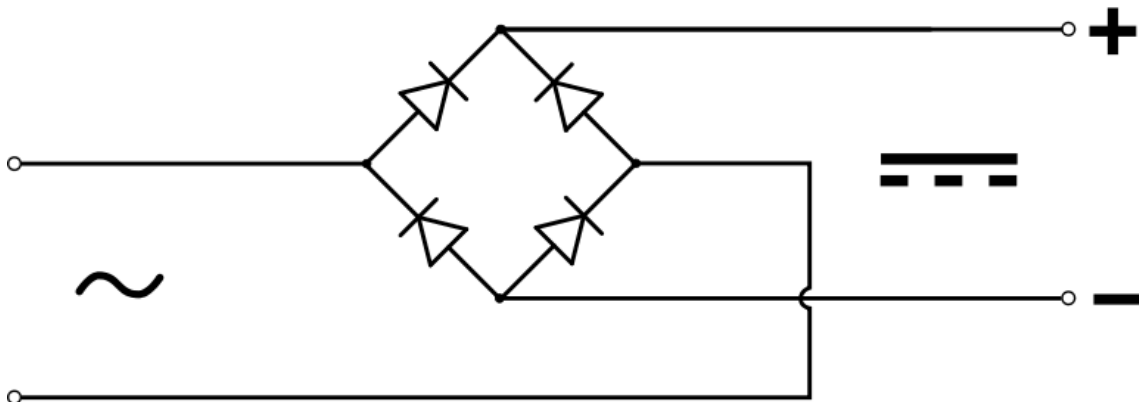
- Modelo: 24900MC
- CCA: 580 Amp
- Polaridad: +/-
- Largo: 260 mm
- Ancho: 173 mm
- Alto: 220 mm

### Puentes rectificadores

Los convertidores de potencia en general sirven para moldear y controlar magnitudes eléctricas de entrada como son: el voltaje de entrada, la frecuencia y el número de fases. Así mismo, el flujo de potencia puede circular de forma reversible, intercambiando las entradas con las salidas.

La mayoría de dispositivos electrónicos funcionan con corriente continua, pero para poder suministrarla es necesario rectificar la polaridad alternante y producir una corriente con polaridad estable, sin esta rectificación se podría provocar daños graves en los componentes electrónicos. Estos puentes rectificadores llevan cuatro diodos que permiten el flujo eléctrico conectándolos en una disposición específica llamada configuración de rectificación. Figura 17.

**Figura 17.** Configuración de rectificación



Fuente: <http://en.wikipedia.org/wiki/User:Wykis>

Para el diseño del banco fueron necesarios los convertidores KBPC5010 50A/1000V CA/CC (corriente alterna a corriente continua), implementados en las salidas del alternador y del motor brushless, los cuales están capacitados para soportar tensión inversa máxima de 1000 V. Tiene corriente de sobretensión máxima de 50A y corriente inversa de 5  $\mu$ A.

Existen otras formas para transformar corriente alterna en continua, pero son métodos más costosos y menos sencillos de implementar, es por esto que se optó por los puentes rectificadores monofásicos ya que siguen siendo más baratos y eficaces.

**Figura 18.** Puente rectificador KBPC5010



Fuente: Mercado libre

Característica de Puente Rectificador KBPC5010 50A/1000V:

- Carcasa de metal
- Tipo de diodo: puente rectificador
- Tipo de puente: una fase
- Voltaje máximo de conducción: 1000 V
- Corriente máxima de conducción: 50 A
- Voltaje inverso de pico: 1 kV
- Voltaje directo  $V_f$  (máx.) a  $I_f$ : 1.1V @ 25A
- Corriente - Fuga inversa a  $V_r$ : 5 $\mu$ A @ 1000V
- Temperatura de funcionamiento: -55°C - 150 °C
- Convertidor de voltaje AC / DC
- Encapsulado metálico: KBPC cuadrado

- Número de pines: 4
- Tamaño de pines: Faston 6.35 mm
- Tamaño total: 2.8x2.8x1.1 cm

### **Instrumentación**

Los instrumentos de medidas eléctricas utilizados para la toma de datos en su mayoría fueron aparatos portátiles de mano, que ayudaron al buen funcionamiento de las instalaciones y máquinas eléctricas en el montaje de cada prueba. Algunos otros instrumentos digitales como el medidor de velocidad del motor brushless, ayudaron al análisis y revisión de los datos para hacerlos aún más prácticos, operando de un modo más rápido para ofrecer resultados durante la medición.

Uno de estos instrumentos con variedad de funciones básicas como el multímetro, permitió la posibilidad de medir distintas magnitudes comunes (voltios, amperios, ohmios) que a su vez se utilizaron algunos de los datos para realizar cálculos tales como la potencia de entrada y salida en cada una de las máquinas eléctricas.

**Figura 19.** Multímetro digital UNIT UT33C.



Fuente: Mercado libre

Otro medidor digital láser como el fototacómetro, desempeñó un papel fundamental en la toma de datos para la velocidad de las máquinas, siendo este más preciso que el medidor de velocidad digital del motor brushless con un amplio rango de medición, alta resolución, registro de valor máximo / mínimo / final.

**Figura 20.** Fototacómetro Dual digital laser.



Fuente: Mercado libre

**Tabla 4.** Especificaciones del fototacómetro Dual digital laser DT-2236C

Funcional	Rango de	Resolución	Incertidumbre
Velocidad	2,5 ~ 999,9	0,1 RPM	±(0.05% + 1d)
	1000 ~ 99999	1RPM	
Velocidad de línea	0,05 ~ 99,99	0,01 M/min	
	Más de 100,0	0,1 M/min	

### **Cargas**

Las cargas usadas durante las pruebas fueron netamente resistivas las cuales consumen la energía eléctrica de tal manera que la disipan como calor, de esta manera se comportan igual tanto en C.C. como en C.A.

Estas resistencias tienen un valor variable entre 200[Ω] a 300 [Ω] cada una, las cuales durante las pruebas respectivas se configuraron en las siguientes combinaciones: una sencilla y la segunda conectadas dos resistencias en paralelo para posteriormente calcular la corriente, tensión y potencia entregada por cada una de las máquinas.

**Figura 21.** Resistencias de 200 a 300 [Ω]



### **Protecciones**

Para seleccionar las protecciones magnetotérmicas (*breakers*), se calcularon las corrientes máximas que consume la excitatriz y el controlador de las máquinas.

La protección de la excitatriz del alternador se calculó tomando el valor de la resistencia del devanado interno y conociendo la tensión de alimentación de la misma, se procedió a calcular la corriente que para ese caso sería la máxima. Por otro lado, la protección del controlador se escogió teniendo en cuenta los datos de placa tanto de tensión como corriente. Además, se tuvieron algunos criterios de selección como:

- Corriente de corte
- Protección para corriente alterna como continua
- Tensión de aislamiento.

Cálculos:

$R_{exc-altern} = 4[\Omega]$  Valor medido con multímetro

$$I_{exc} = \frac{V_{bateria}}{R_{exc}} = \frac{12}{4} = 3[A]$$

Con este valor hallado se escogió el primer breaker para la alimentación de la excitatriz del alternador y se adquirió un breaker comercial de marca Schneider de 12 [V] - 4 [A].

El segundo breaker se halló por medio de la corriente máxima del controlador la cual es de 22 [A] y se adquirió otro breaker de marca Schneider de 48 [V]-30[A].

**Figura 22.** Breakers IC60N 1P 4A y 32A.



## 4. PRESUPUESTO

El costo total del proyecto fue asumido 100% desde el inicio hasta el final por los integrantes del mismo, para así poder determinar un presupuesto coherente y detallado para la realización del banco y el cual está estipulado en la siguiente tabla.

**Tabla 5.** Presupuesto Banco de Motor Brushless

<b>Presupuesto proyecto: banco de pruebas para la caracterización de un motor brushless</b>				
<b>Presupuesto total</b>	<b>3.003.000,00</b>			
<b>Gastos Fijos</b>	<b>Monto</b>	<b>cantidad</b>	<b>%Asignado</b>	<b>Subtotal</b>
Kit de Bicicleta Eléctrica 1000 [W]	1.200.000,00	1	39,96%	1.200.000,00
Alternador de 1000[W]	375.000,00	1	12,49%	375.000,00
Polea de $\Phi$ 80 [Cm]	70.000,00	1	2,33%	70.000,00
Ornamentacion de Estructura	300.000,00	1	9,99%	300.000,00
Tabla Madecor 110x37 [Cm <sup>2</sup> ]	50.000,00	1	1,67%	50.000,00
Tablero En Triplex y MDF 90x42 [Cm <sup>2</sup> ]	120.000,00	1	4,00%	120.000,00
Rodachines	12.000,00	4	1,60%	48.000,00
Pintura de estructura y tablero	100.000,00	1	3,33%	100.000,00
Borneras	3.000,00	30	3,00%	90.000,00
Cable Vehicular	1.500,00	10	0,50%	15.000,00
Calcomanias en Vinilo	40.000,00	3	4,00%	120.000,00
Breakers Schneider de CD	40.000,00	2	2,66%	80.000,00
<b>Gastos Extras</b>	<b>Monto</b>	<b>cantidad</b>	<b>%Asignado</b>	<b>Subtotal</b>
Carpinteria	90.000,00	1	3,00%	90.000,00
transporte	150.000,00	1	5,00%	150.000,00
alquiler de herramientas	80.000,00	1	2,66%	80.000,00
cables para conexiones externas	45.000,00	1	1,50%	45.000,00
imprevistos	70.000,00	1	2,33%	70.000,00
<b>Gastos Totales</b>				<b>3.003.000,00</b>

## 5. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

### 5.1 PRUEBA N°1 MOTOR BRUSHLESS EN VACÍO (SIN ACOPLA AL ALTERNADOR)

En esta prueba se energizó el motor brushless en vacío a través del controlador, se manejaron distintas velocidades en rpm para visualizar cómo cambia la tensión AC en los terminales del motor brushless y la corriente que consume el controlador de la fuente de 48 V (fuente DC).

**Tabla 6.** Datos medidos en el motor Brushless

W[r/s]	Rpm	I <sub>ec</sub> [A]	V <sub>dc</sub> [V]	P <sub>in</sub> [W]	V <sub>3f</sub> [V]
6,995279642	66,8	0,19	48,2	9,158	6,3
11,32020553	108,1	0,24	48,2	11,568	9,2
14,18952682	135,5	0,28	48,2	13,496	12
17,84424627	170,4	0,33	48,2	15,906	15
21,84454092	208,6	0,39	48,2	18,798	18,3
23,92846404	228,5	0,43	48,2	20,726	20,2
28,50471734	272,2	0,54	48,2	26,028	23,9
31,83480556	304	0,58	48,2	27,956	26,7
35,71990847	341,1	0,68	48,2	32,776	30
38,42167815	366,9	0,74	48,2	35,668	31,6
43,0188754	410,8	0,84	48,2	40,488	35,5

$$KV_{MB} = V/RPM = (31,6-9,2) / (366,9-108,1) = 0.086 [V/rpm]$$

W = Velocidad angular

Rpm = Revoluciones por min

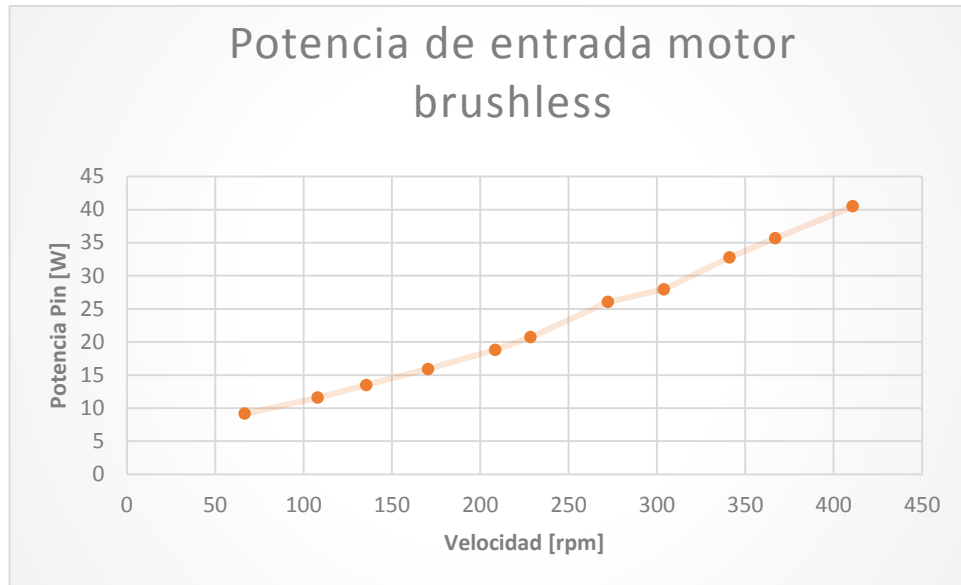
I<sub>ec</sub> = Corriente de alimentación controlador (DC)

V<sub>dc</sub> = Tensión de alimentación controlador

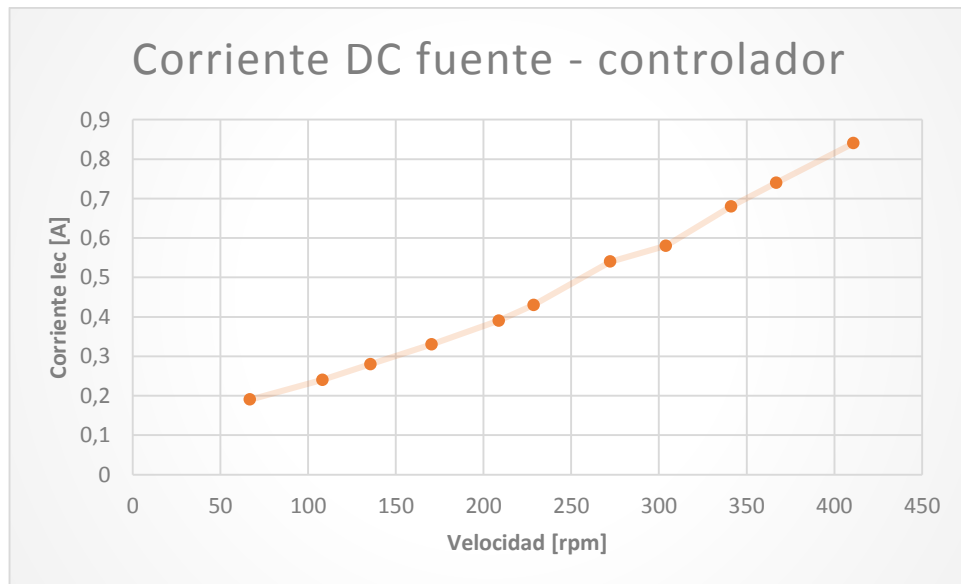
V<sub>3f</sub> = Tensión de salida del controlador (Vac)

P<sub>in</sub> = Potencia de entrada en el motor Brushless

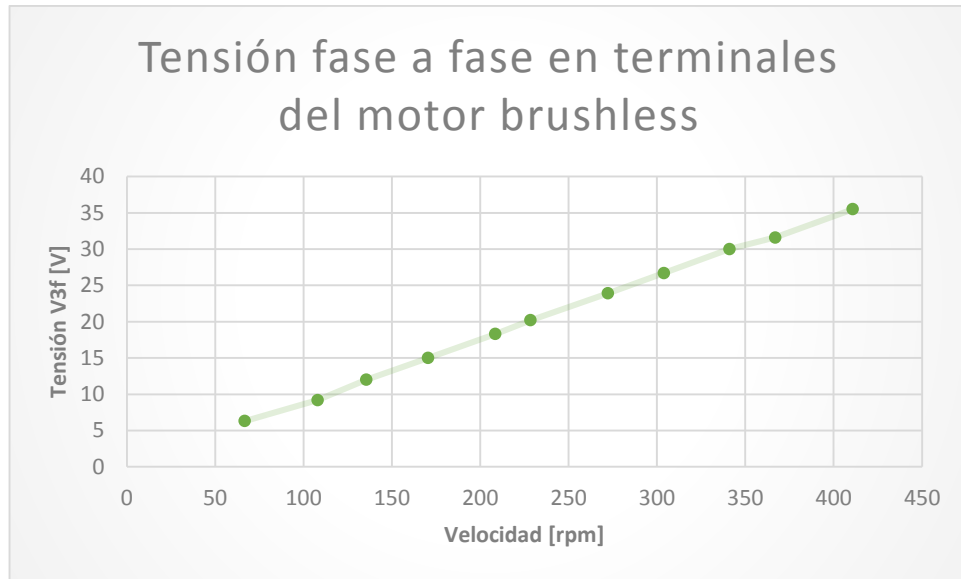
**Figura 23.** Potencia de entrada motor Brushless Prueba N°1.



**Figura 24.** Corriente DC de la fuente en prueba N°1.



**Figura 25.** Tensión fase a fase en terminales del motor Brushless en prueba N°1.



## **5.2 PRUEBA N°2 BRUSHLESS ACOPLADO AL ALTERNADOR CON CARGA RESISTIVA DE 300Ω**

En esta prueba se energizó el motor brushless acoplado con el alternador a través de una banda, se manejaron distintas velocidades en rpm para visualizar cómo cambio la tensión que suministro el controlador en los terminales del motor brushless y la corriente que consume el controlador de la fuente de 48 V, también se apreció cómo el alternador generó diferentes tensiones fase a fase las cuales fueron rectificadas para entregar diferentes valores de corrientes DC a la resistencia de 300Ω.

**Tabla 7.** Datos medidos de la prueba N°2 motor brushless -alternador.

Datos del brushless						Datos alternador					
W[r/s]	Rpm	Iec [A]	Vdc [V]	Pin [W]	V3f [V]	W[r/s]	Rpm	Icr [A]	r [Ω]	Pout [W]	V3Φa [V]
4,87	46,6	0,97	48,2	46,754	5,6	55,48	529,842	0,01	300	0,03	5,2
6,07	58	1,21	48,2	58,322	6,9	69,05	659,46	0,02	300	0,12	6,3
9,52	91	1,92	48,1	92,352	9,9	108,35	1034,67	0,03	300	0,27	9,7
12,71	121,4	2,7	48,1	129,87	12,3	144,54	1380,318	0,05	300	0,75	12,3
16,50	157,6	3,96	48	190,08	15,9	187,64	1791,91	0,06	300	1,08	16,5
19,09	182,3	4,95	47,9	237,10	18,8	217,05	2072,75	0,07	300	1,47	19,1
22,19	211,9	6,25	47,8	298,75	21,4	252,30	2409,30	0,09	300	2,43	22,2
25,60	244,5	7,74	47,6	368,42	24,4	291,11	2779,96	0,1	300	3	25,7
28,81	275,2	9,02	47,4	427,54	27,3	327,67	3129,02	0,12	300	4,32	28,5
33,38	318,8	12,34	47,1	581,21	32	379,58	3624,75	0,14	300	5,88	33,3

$$KV MB = V/RPM = (21,4-6,9) / (211,9-58) = 0.09 [V/rpm]$$

W = Velocidad angular

Rpm = Revoluciones por min

Iec = Corriente de alimentación controlador (DC)

Vdc = Tensión de alimentación controlador

Pin = Potencia de entrada en el motor Brushless

V3f = Tensión de salida del controlador (Vac)

#### Datos alternador

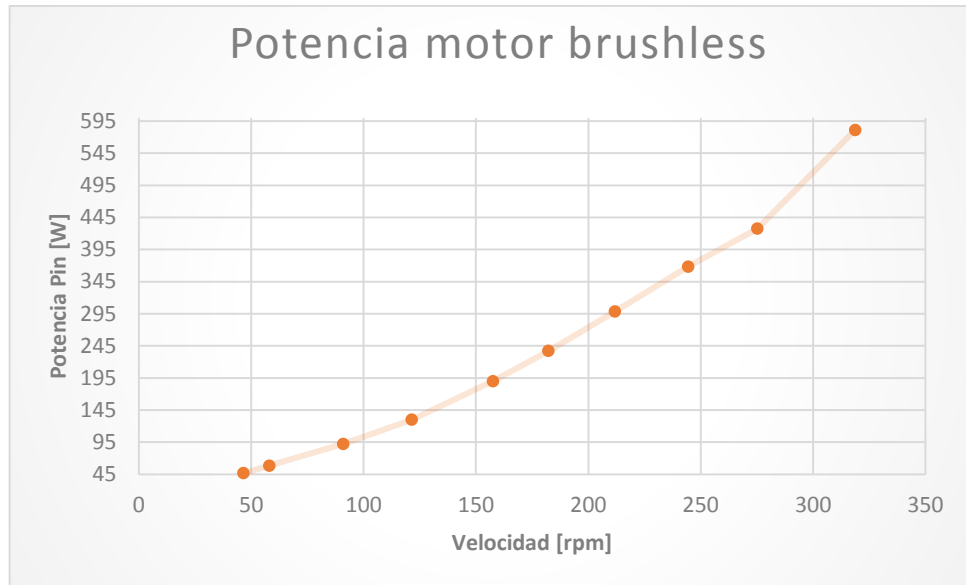
Icr = Corriente continua en la resistencia

R = Resistencia (carga)

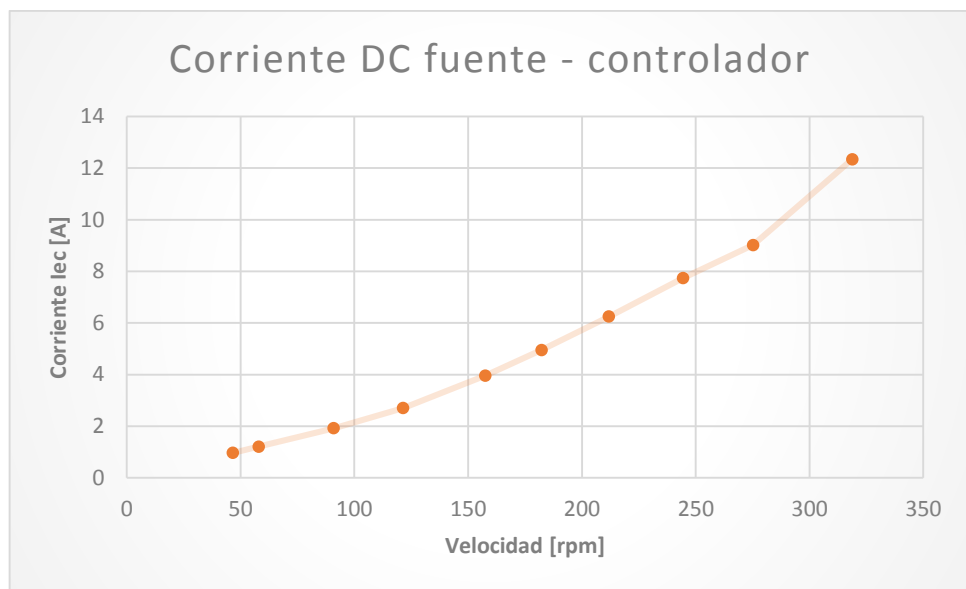
Pout = Potencia de salida en el alternador

V3Φa = Tensión trifásica en el alternador

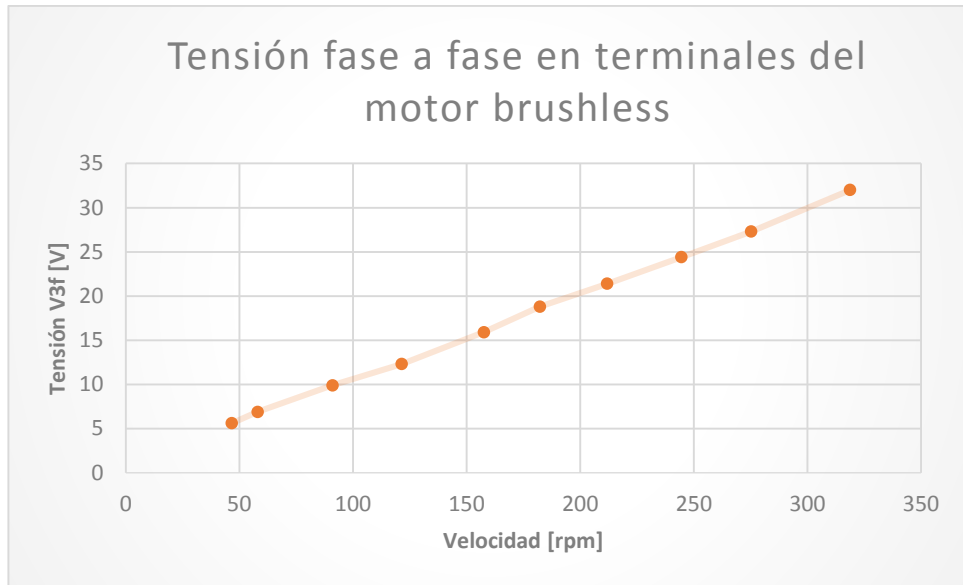
**Figura 26.** Potencia de entrada motor Brushless en prueba N°2.



**Figura 27.** Corriente DC de la fuente en prueba N°2.



**Figura 28.** Tensión fase a fase en terminales del motor Brushless en prueba N°2.



**Figura 29.** Potencia entregada al alternador con carga 300 ohm

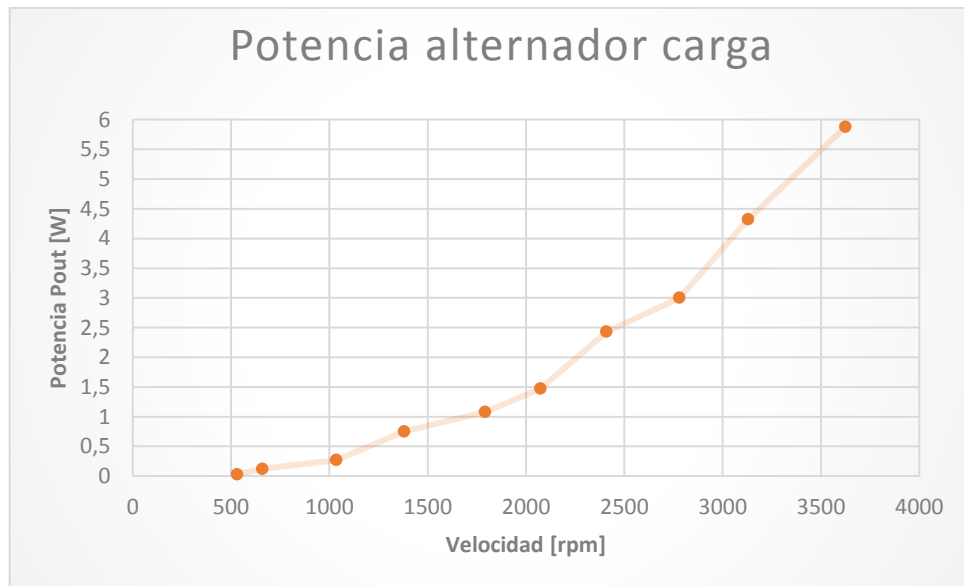


Figura 30. Conexiones para la prueba N<sup>o</sup> 2 y N<sup>o</sup> 5



### 5.3 PRUEBA N°3 BRUSHLESS ACOPLADO AL ALTERNADOR CON CARGA RESISTIVA DE 150Ω

En esta prueba se energizó el motor brushless acoplado con el alternador a través de una banda, se manejaron distintas velocidades en rpm para visualizar cómo cambio la tensión que suministro el controlador en los terminales del motor brushless y la corriente que consume el controlador de la fuente de 48 V, también se apreció cómo el alternador generó diferentes tensiones fase a fase las cuales fueron rectificadas para entregar diferentes valores de corrientes DC a la resistencia de 150Ω.

**Tabla 8.** Datos medidos de la prueba N°3 motor brushless -alternador.

Datos del brushless						Datos alternador					
W[r/s ]	Rpm	Iec [A]	Vdc [V]	Pin [W]	V3f [V]	W[r/s ]	Rpm	Icr [A]	r [Ω]	Pout [W]	V3φa [V]
0,10	46,6	0,85	48,2	40,97	4,9	55,48	529,84	0,03	150	0,135	4,3
6,07	58	1,13	48,2	54,466	6,3	69,05	659,46	0,04	150	0,24	5,8
						108,3	1034,6				
9,52	91	1,92	48,2	92,544	9,9	5	7	0,07	150	0,735	9,6
	121,			133,23		144,5	1380,3				
12,71	4	2,77	48,1	7	12,5	4	1	0,1	150	1,5	12,6
	157,					187,6	1791,9				
16,50	6	3,92	48	188,16	15,8	4	1	0,13	150	2,535	16,1
	182,					217,0	2072,7				
19,09	3	4,99	48	239,52	18,7	5	5	0,16	150	3,84	19,1
	211,					252,3	2409,3				
22,19	9	6,4	47,8	305,92	21,9	0	0	0,19	150	5,415	22,7
	244,			378,26		291,1	2779,9				
25,60	5	7,93	47,7	1	24,6	1	6	0,21	150	6,615	25,9
	275,			450,77		327,6	3129,0				
28,81	2	9,47	47,6	2	27,5	7	2	0,24	150	8,64	29
	308,			533,72		366,8	3503,0				
32,26	1	11,26	47,4	4	30,3	4	9	0,27	150	10,93	32

$$KV MB = V/RPM = (27,5-9,9) / (275,2-91) = 0.09 [V/rpm]$$

W = Velocidad angular

Rpm = Revoluciones por min

Iec = Corriente de alimentación controlador (DC)

$V_{dc}$  = Tensión de alimentación controlador

$P_{in}$  = Potencia de entrada en el motor *Brushless*

$V_{3f}$  = Tensión de salida del controlador ( $V_{ac}$ )

### Datos alternador

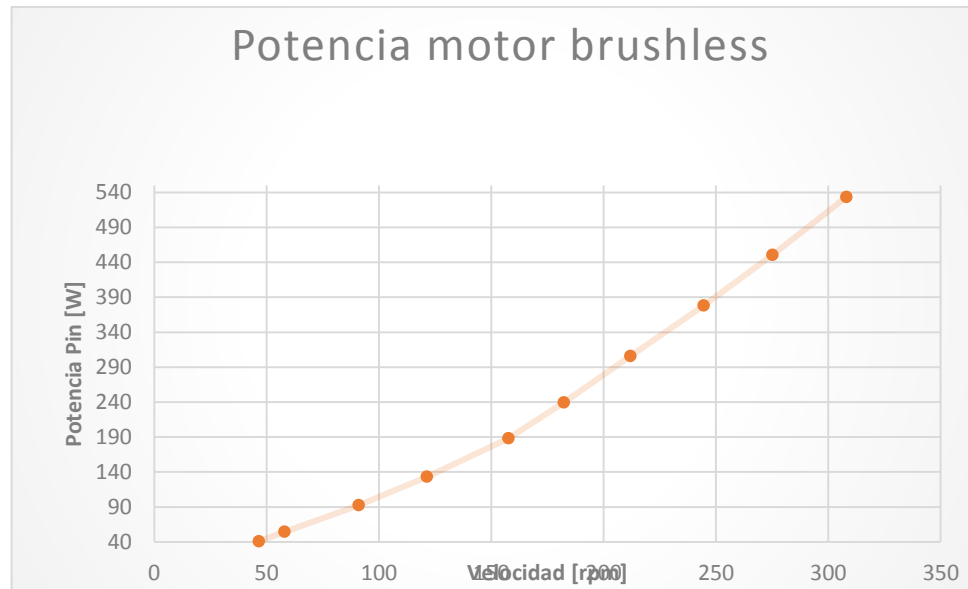
$I_{cr}$  = Corriente continua en la resistencia

$R$  = Resistencia (carga)

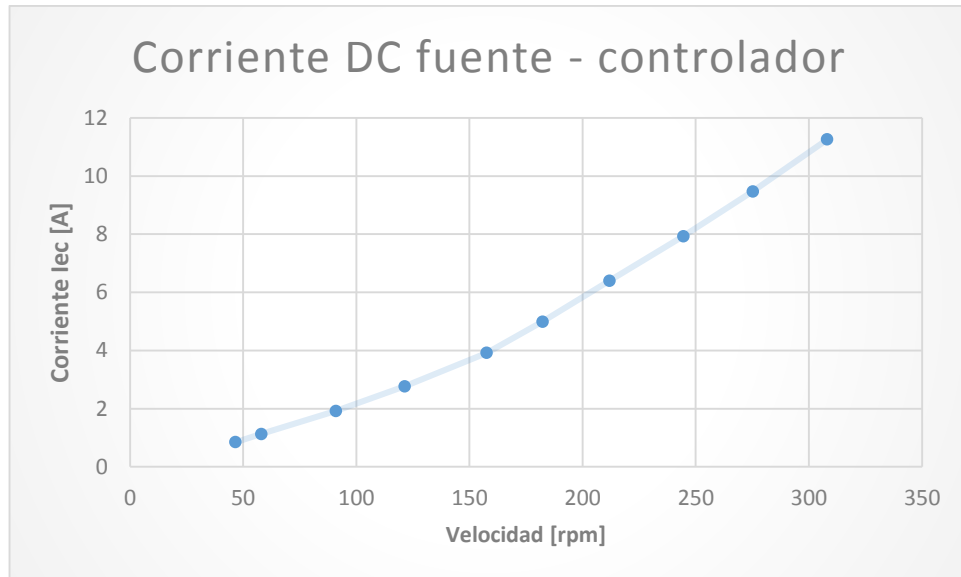
$P_{out}$  = Potencia de salida en el alternador

$V_{3\Phi a}$  = Tensión trifásica en el alternador

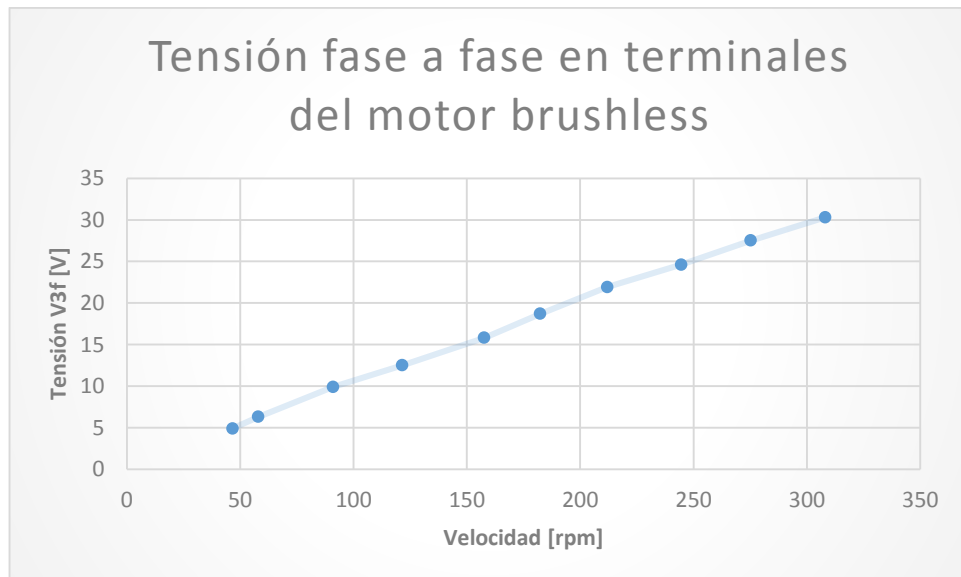
**Figura 31.** Potencia de entrada motor Brushless en prueba N°3.



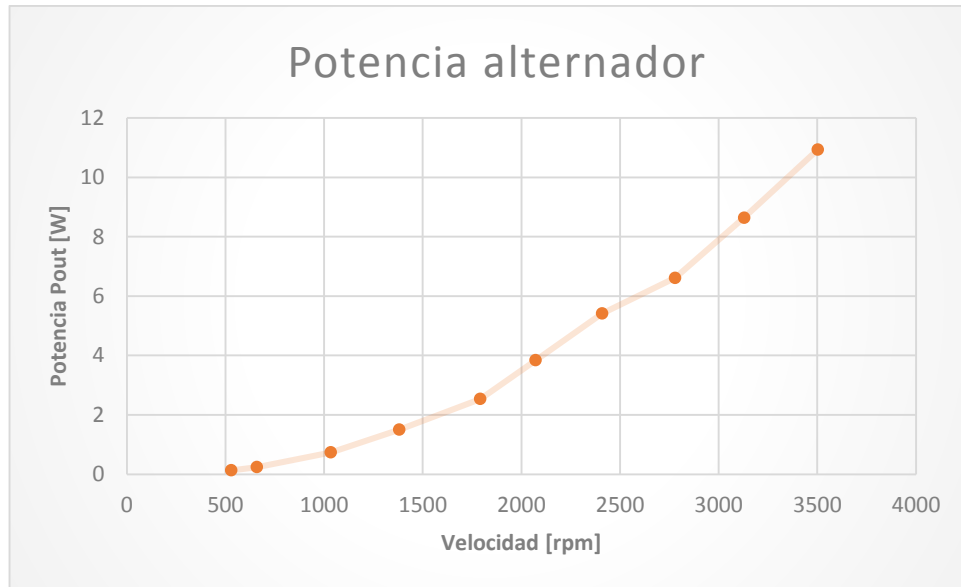
**Figura 32.** Corriente DC de la fuente en prueba N°3.



**Figura 33.** Tensión fase a fase en terminales del motor Brushless en prueba N°3



**Figura 34.** Potencia entregada alternador con carga 150 Ω.



#### 5.4 PRUEBA N°4. GENERADOR BRUSHLESS EN VACÍO ACOPLADO AL ALTERNADOR COMO MOTOR

Para esta prueba se acopló un taladro en el eje del alternador para trabajar como motor y por medio de la banda se transmitió el movimiento al Brushless del cual se tomaron los datos de las tensiones generadas a diferentes velocidades, se midieron los valores de tensión y corriente del taladro para calcular la potencia del mismo.

**Tabla 9.** Datos medidos en el generador Brushless.

Datos del brushless				Datos alternador				
W[r/s]	RPM	V3f [V]	Vrec [V]	W[r/s]	RPM	Vta 110	I <sub>ta</sub>	P <sub>in</sub>
4,97	47,5	4	5,3	56,55	540,07	125,5	1,02	128,01
8,33	79,6	6,7	9,4	94,77	905,05	125	1,11	138,75
9,41	89,9	7,7	10,1	107,04	1022,16	124,5	1,15	143,175
13,60	129,9	11,2	14,8	154,66	1476,96	124,4	1,22	151,768
14,51	138,6	12	16,1	165,02	1575,88	124,2	1,32	163,944
16,52	157,8	13,8	18,2	187,88	1794,18	124,1	1,39	172,499
18,22	174	15,1	20,3	207,17	1978,38	123,9	1,46	180,894
20,01	191,1	16,6	22,2	227,53	2172,80	123,9	1,52	188,328
25,34	242	21,1	28,2	288,14	2751,54	122,3	2,21	270,283

$$KV_{MB} = V/RPM = (16,6-4) / (191,1-47,5) = 0.087 [V/rpm]$$

W = Velocidad angular

Rpm = Revoluciones por min

Vrec = Tensión rectificada Vdc

V3f = Tensión trifásica generada por el brushless Vac

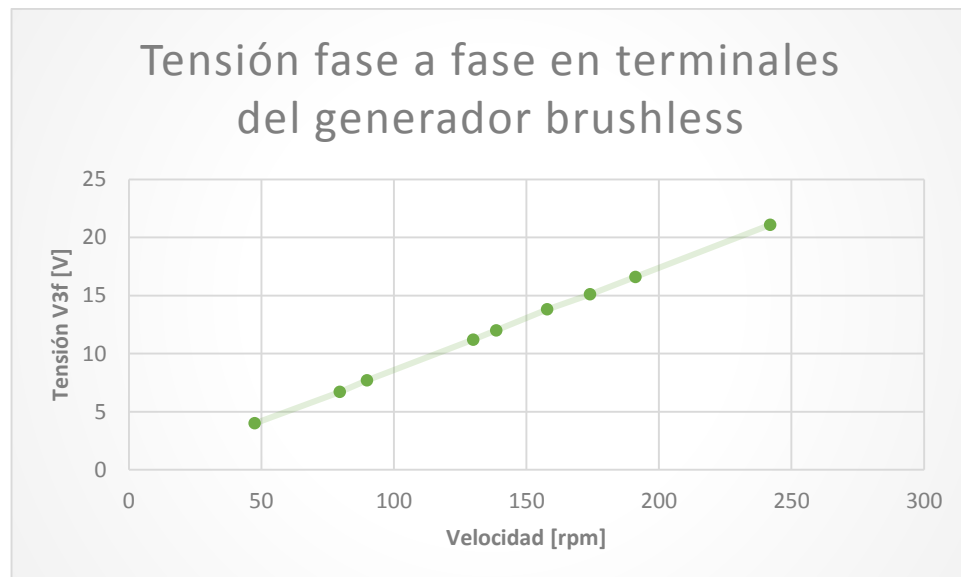
### Datos alternador

Vta 110 = Tensión AC taladro

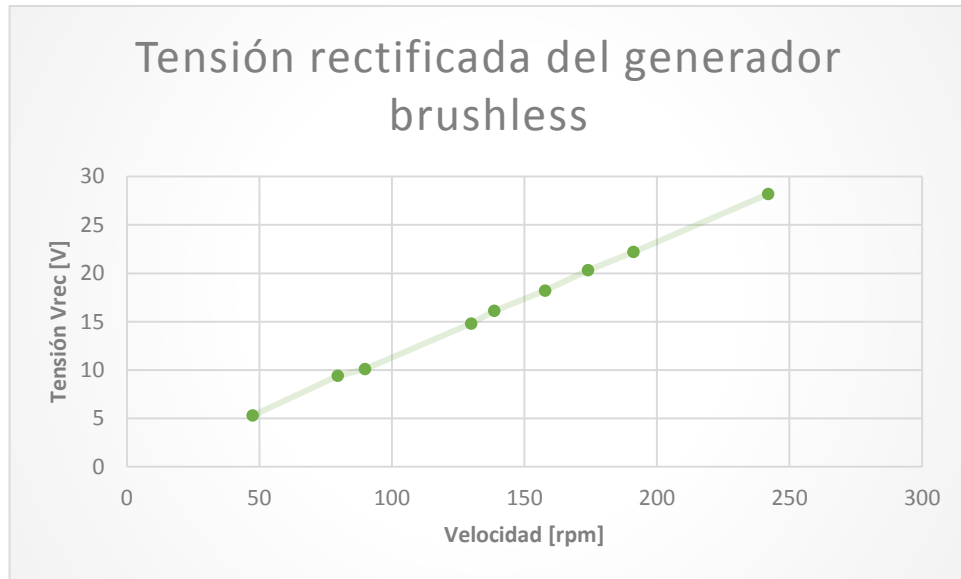
I<sub>ta</sub> = Corriente alterna taladro

P<sub>in</sub> = Potencia taladro

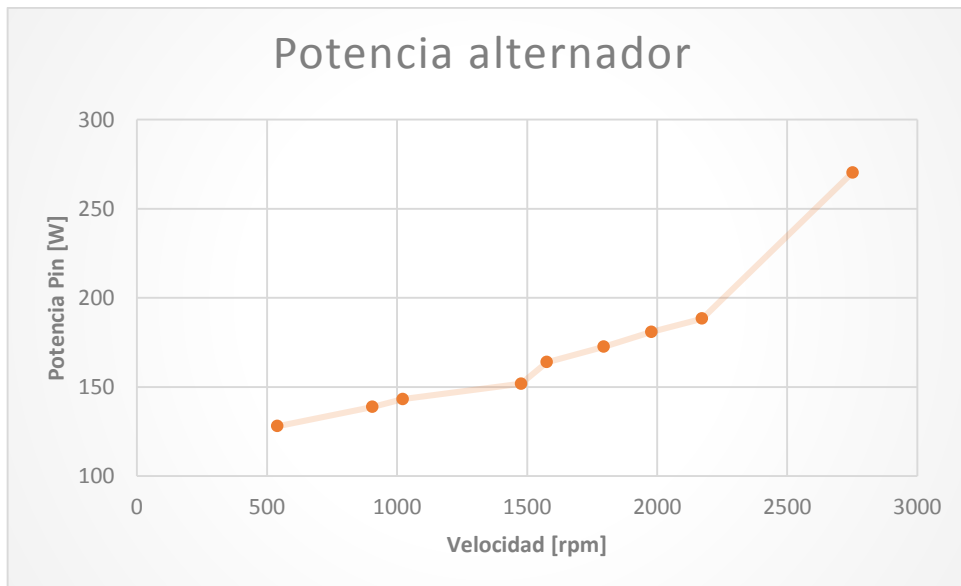
**Figura 35.** Tensión fase a fase en terminales del *Brushless*.



**Figura 36.** Tensión rectificada del generador Brushless.



**Figura 37.** Potencia entrada alternador



## 5.5 PRUEBA N°5 GENERADOR BRUSHLESS ACOPLADO AL ALTERNADOR COMO MOTOR CON CARGA DE 300Ω

Para esta prueba se acopló un taladro en el eje del alternador y por medio de la banda se transmitió el movimiento al Brushless con carga eléctrica resistiva de 300Ω, del cual se tomaron los datos de las tensiones generadas a diferentes velocidades y corriente en la resistencia, se midieron los valores de tensión y corriente del taladro para calcular la potencia de este

**Figura 38.** Datos medidos en el generador Brushless con carga de 300Ω.

Datos del brushless						Datos alternador				
W[r/s]	RPM	Icr [A]	Vr [V]	Pout [W]	V3f [V]	W[r/s]	RMP	Vta 110	Ita	Pin [W]
24,55	234,5	0,08	25,6	2,048	19,9	279,21	2666,26	124,9	1,98	247,302
20,70	197,7	0,07	20,6	1,442	17,4	235,39	2247,84	125	1,55	193,75
19,60	187,2	0,065	20,1	1,3065	15,9	222,89	2128,46	125,1	1,46	182,646
17,79	169,9	0,06	18	1,08	14,8	202,29	1931,76	125,2	1,41	176,532
16,4	157,1	0,05	15,3	0,765	13	187,05	1786,22	125,3	1,35	169,155
13,7	131,5	0,04	14	0,56	11,2	156,5	1495,15	125,4	1,28	160,512
9,20	87,9	0,03	8,5	0,255	7,4	104,6	999,42	125,8	1,14	143,412
7,16	68,4	0,02	6,8	0,136	5,9	81,4	777,70	125,9	1,07	134,713

$$KV MB = V/RPM = (17,4-7,4) / (197,7-87,9) = 0.09 [V/rpm]$$

W = Velocidad angular

Rpm = Revoluciones por min

Icr = Corriente continua en la resistencia

Vr = Tensión continua en la resistencia

Pout = Potencia entregada por el brushless

V3f = Tensión trifásica generada por el brushless Vac

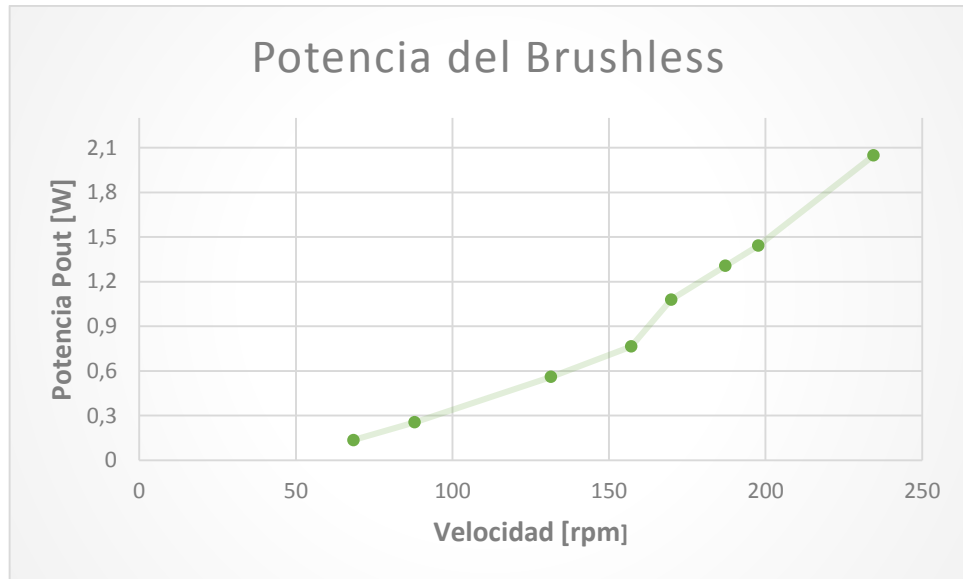
### Datos alternador

Vta 110 = Tensión AC taladro

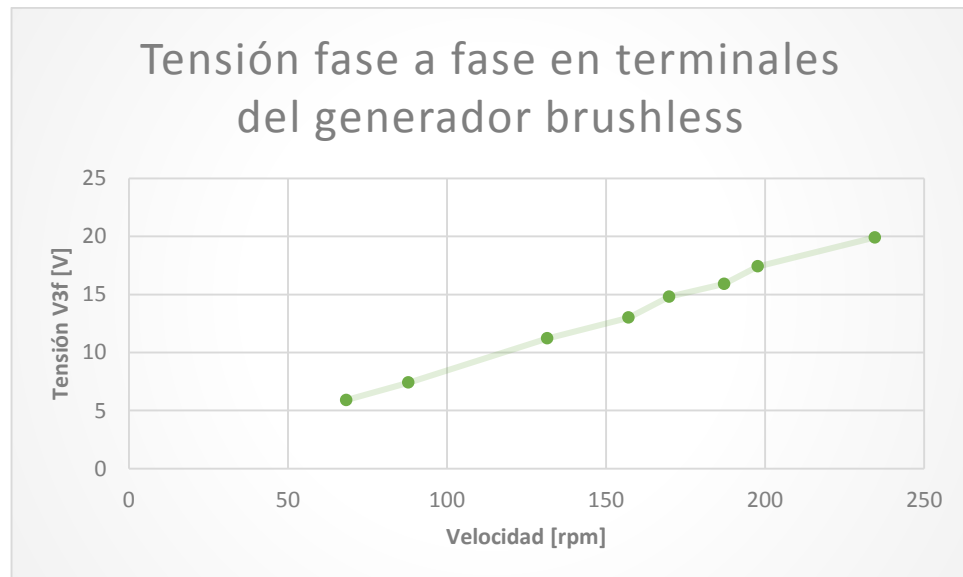
Ita = Corriente alterna taladro

Pin = Potencia taladro

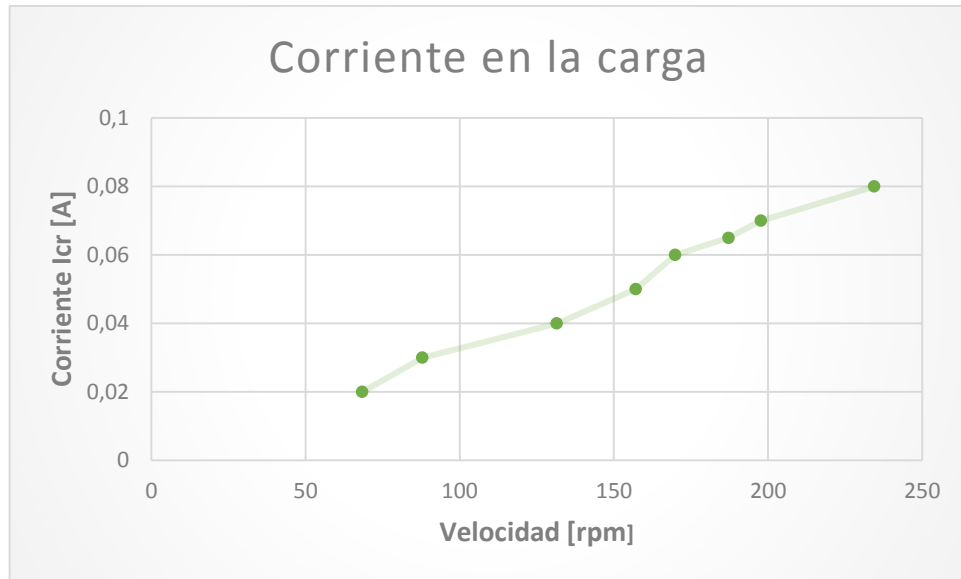
**Figura 39.** Potencia entregada por el Brushless con carga 300Ω.



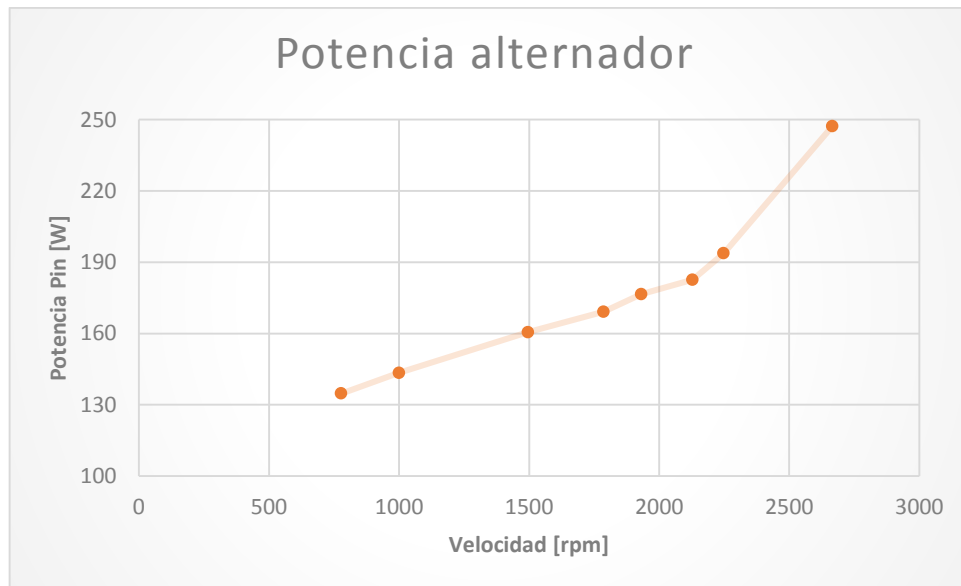
**Figura 40.** Tensión fase a fase en generador Brushless con carga 300Ω.



**Figura 41.** Corriente en la carga 300Ω.



**Figura 42.** Potencia de entrada del alternador



## 5.6 PRUEBA N°6 GENERADOR BRUSHLESS ACOPLADO AL ALTERNADOR COMO MOTOR CON CARGA DE 150Ω.

Para esta prueba se acopló un taladro en el eje del alternador y por medio de la banda se transmitió el movimiento al Brushless con carga eléctrica resistiva de 150Ω, del cual se tomaron los datos de las tensiones generadas a diferentes velocidades y corriente en la resistencia, se midieron los valores de tensión y corriente del taladro para calcular la potencia de este.

**Tabla 10.** Datos medidos en el generador Brushless con carga de 150Ω.

Datos del brushless						Datos alternador				
W[r/s]	RPM	Icr [A]	Vr [V]	Pout [W]	V3f [V]	W[r/s]	RMP	Vta 110	Ita	Pin [W]
6,97	66,6	0,04	6,8	0,272	5,9	79,29	757,2	125,2	1,14	142,728
8,91	85,1	0,06	9	0,54	7,4	101,32	967,5	125,1	1,18	147,618
10,52	100,5	0,07	11,1	0,777	8,9	119,66	1142,6	125	1,23	153,75
12,44	118,8	0,08	12,8	1,024	10	141,45	1350,7	124,9	1,28	159,872
14,44	137,9	0,09	14,5	1,305	11,6	164,19	1567,9	124,8	1,37	170,976
18,08	172,7	0,11	18,2	2,002	14,8	205,62	1963,5	124,7	1,44	179,568
18,89	180,4	0,12	19	2,28	15,2	214,79	2051,1	124,6	1,49	185,654
20,13	192,3	0,13	20,4	2,652	16,3	228,96	2186,4	124,5	1,54	191,73
20,90	199,6	0,14	21,2	2,968	17	237,65	2269,4	124,4	1,6	199,04
24,94	238,2	0,17	26,1	4,437	20,4	283,61	2708,3	123,7	2,16	267,192

$$KV MB = V/RPM = (17-10) / (199,6-118,8) = 0.09 [V/rpm]$$

W = Velocidad angular

Rpm = Revoluciones por min

Icr = Corriente continua en la resistencia

Vr = Tensión continua en la resistencia

Pout = Potencia entregada por el brushless

V3f = Tensión trifásica generada por el brushless Vac

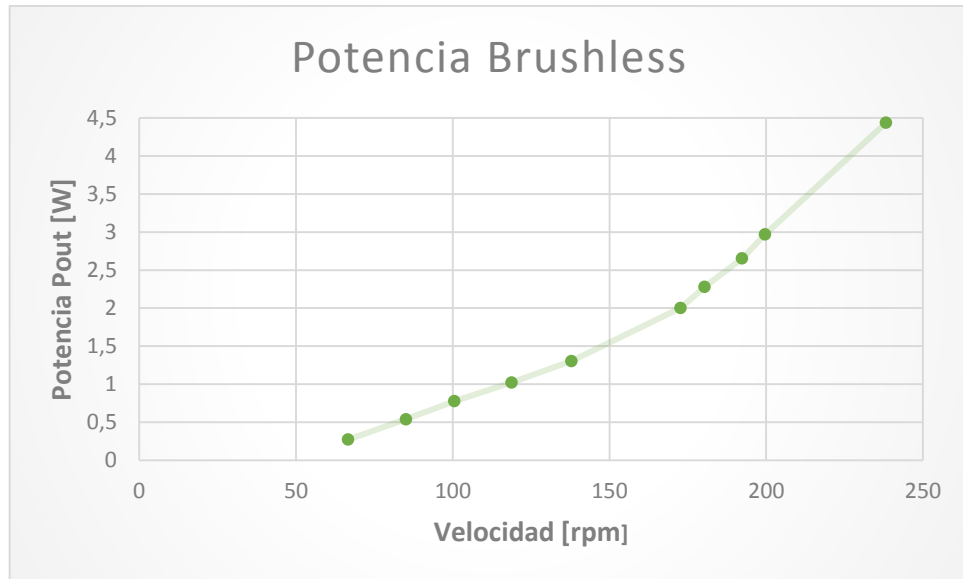
### Datos alternador

Vta 110 = Tensión AC taladro

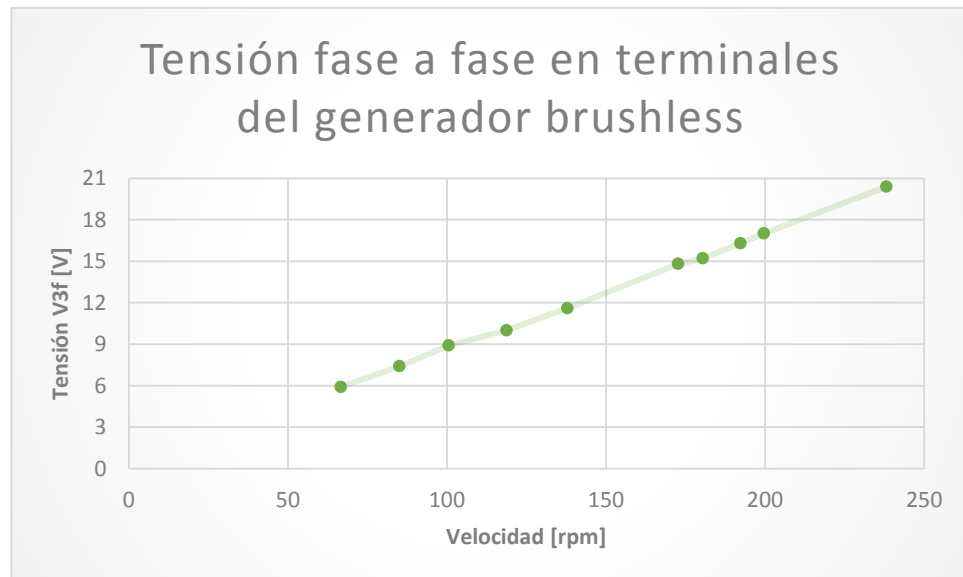
Ita = Corriente alterna taladro

Pin = Potencia taladro

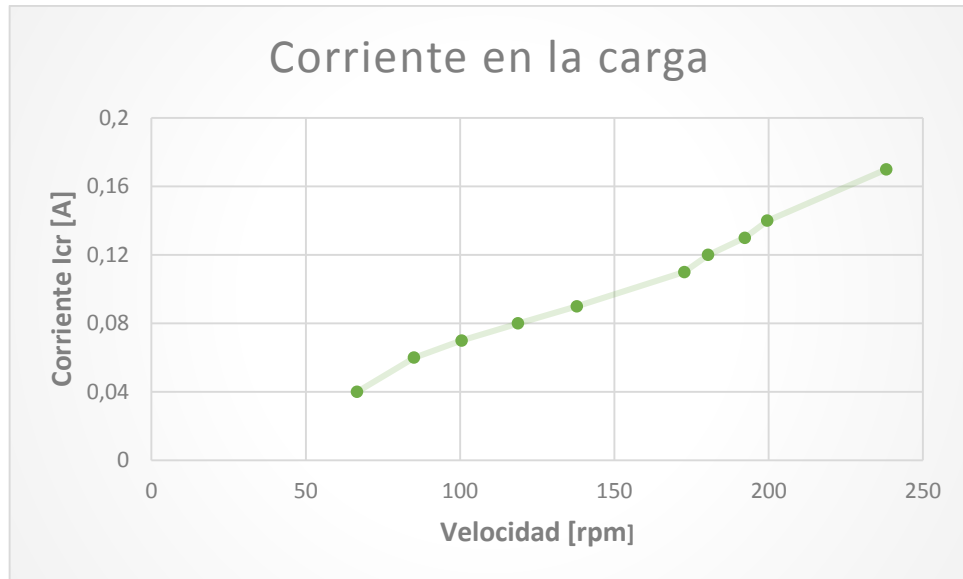
**Figura 43.** Potencia entregada por el Brushless con carga  $150\Omega$



**Figura 44.** Tensión fase a fase en generador *Brushless* con carga  $150\Omega$ .



**Figura 45.** Corriente en la carga 150Ω.



**Figura 46.** Potencia entrada del alternador

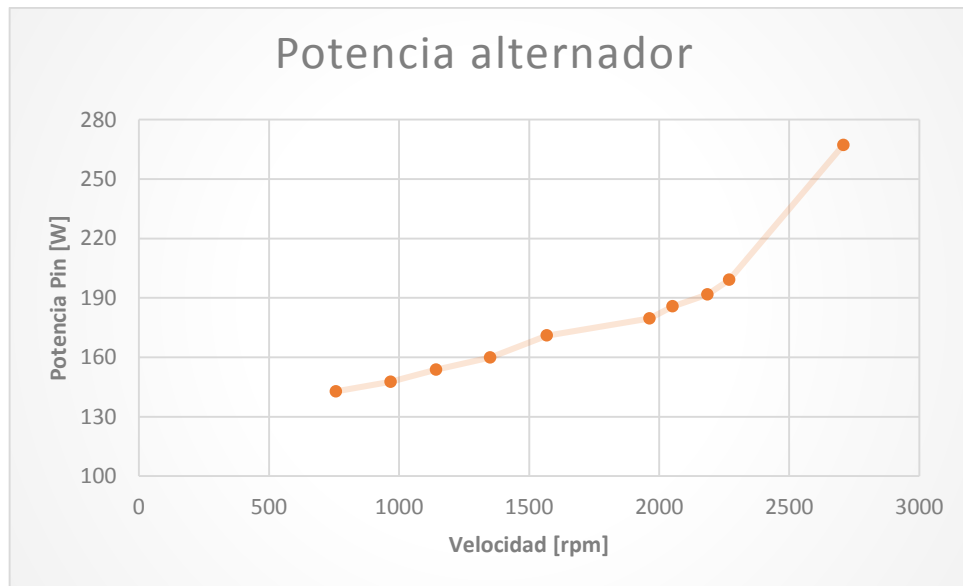


Figura 47. Conexiones para la prueba N<sup>o</sup> 5 y N<sup>o</sup> 6.



## 6. CONCLUSIONES

En este proyecto se concluye que la tensión de entrada ( $V_{in-controller}$ ) como de salida ( $V_{out-controller}$ ) del controlador es directamente proporcional a las RPM del motor Brushless en vacío y que la corriente en vacío consumida en el controlador es pequeña porque varía entre 0 y 1 amperio.

El Motor brushless en vacío gira a 410.8 [rpm] pero acoplado al alternador por medio de la banda y este alternador a su vez alimentando una carga resistiva, hace que el motor Brushless baje sus RPM por debajo de 320.

Aunque se buscaron máquinas de la misma potencia (Motor Brushless y alternador) aproximadamente con una potencia de 1000 [W] En el muestreo de las tensiones de fase-fase tanto del controlador como del alternador varían muy poco aproximadamente un 5%.

Como sabemos en la prueba del controlador, el cual está acoplado al alternador y este último a su vez alimentando una carga resistiva, se puede deducir que la corriente normalmente consumida por este (controlador) varía aproximadamente entre 1 [A] y 12 [A].

Las KV se aproximaron a 0.09 para cálculos con dos cifras decimales

En la prueba de la maquina brushless como generador se utilizó un taladro para hacerlo girar y se concluyó que la potencia que consume el taladro es mayor a la que entrega el brushless en las resistencias de carga.

En la prueba de la maquina brushless como motor y el alternador como generador se concluyó que la potencia que consume el brushless es mayor a la que entrega el alternador en las resistencias de carga.

## BIBLIOGRAFIA

Alternador. ¿Qué es y cómo funciona un alternador? October 8, 2017 admin Motor. Disponible en: <https://caymansseo.com/que-es-como-funciona-un-alternador>

Características de motores Brushless. Blog. Tecnocio, guía de funcionamientos motores. Disponible en: <https://tecnocio.com/blog/guia-motores-brushless-que-son-como-funcionan-caracteristicas-precios/>

Como Funciona Una Bicicleta Eléctrica. Video. YouTube. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=gkHG68o8zkk>

Delgado M. José David. Bolaños P. Camilo José. Controlador. Control de velocidad para motor dc brushless sin sensores. Disponible en: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/13593/DelgadoJoseDavid2013.pdf;sequence=1>

José David Delgado M. Camilo José Bolaños P. Control de velocidad para motor dc brushless sin sensores.

Mateos Aparicio Juan Pedro. Autofacil. Para qué sirve un alternador y cómo funciona. Publicado el martes 13 de octubre de 2020 disponible en: <https://www.autofacil.es/tecnica/2014/11/13/sirve-alternador-funciona/21469.html>

Motor Brushless (Sin Escobillas). Características Fundamentales. Universidad Politécnica de Cartagena. Disponible en: <http://masteringenieros.com/wp-content/uploads/pdf/MI50N/-www-adsnt-recursos-masteringenieros-file-motor.pdf>

Presentación sobre Sensores de Torque Rotatorios. Video. YouTube. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=iBpJhRjTyw8>

Sensor efecto hall. Bicicletas Eléctricas. ¿Cómo Funcionan? Disponible en: [https://bicicletaselectricas.wordpress.com/disenodeuncontroladorbrushless-para-bicicleta/](https://bicicletaselectricas.wordpress.com/disenodeuncontroladorbrushlesspara-bicicleta/)

Tipos de motores rotativos para proyectos de arduino. Ingeniería, informática y diseño. Publicado en 2020. Disponible en: <https://www.luisllamas.es/tipos-motores-rotativos-proyectos-arduino/>

Características de la batería de plomo ácido. Disponible en: <https://www.bateriasmac.com/es-co/productos/baterias-mac-silver-plus>

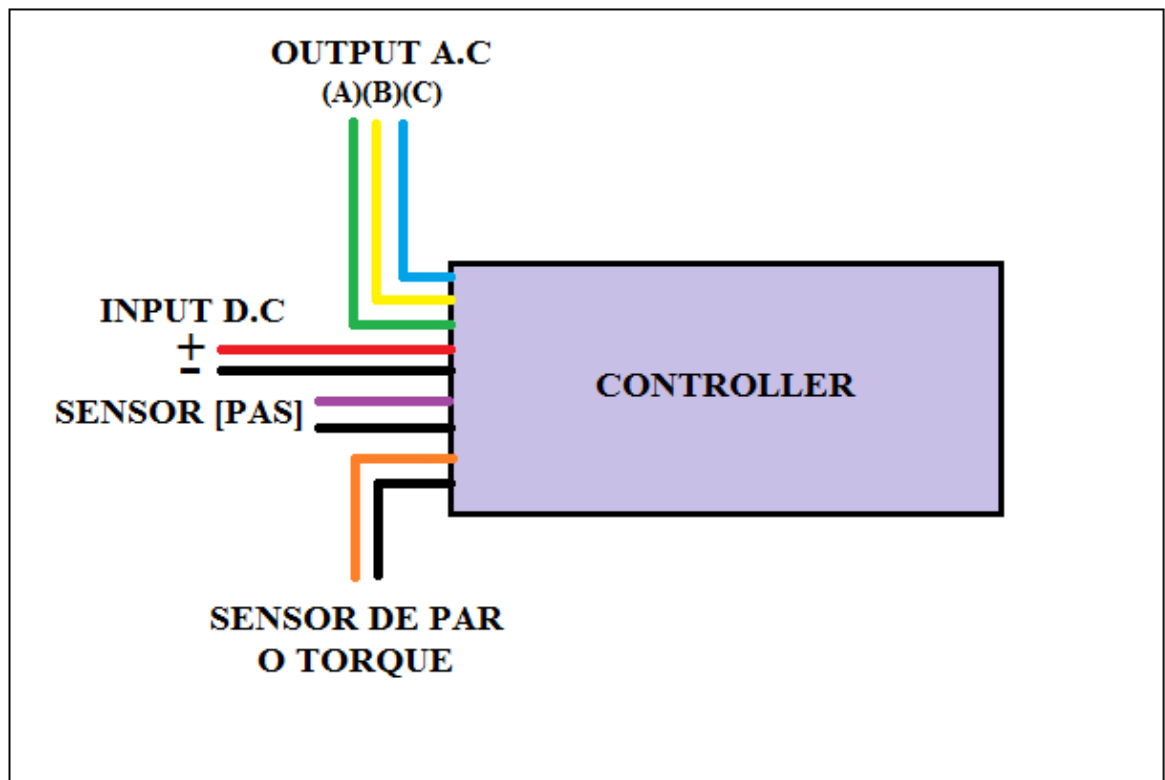
Teoría sobre los tipos de fuentes de alimentación. Disponible en: <https://concepto.de/fuente-de-alimentacion/#:~:text=La%20fuente%20de%20poder%20o,los%20dispositivos%20electr%C3%B3nicos%20tales%20como>

## ANEXOS

### ANEXO A. IDENTIFICACION DE LAS TERMINALES DE UN CONTROLADOR

Actualmente, los controladores de motores Brushless vienen fabricados de tal manera con una variedad de terminales que se debe aprender a identificar, porque muchos de ellos provienen de China, India y Estados Unidos, por lo tanto sus terminales están identificadas con letras o en otro idioma diferente al español. Se especificaran y se identificarán los terminales de un controlador de la siguiente manera:

- **OUTPUT A.C:** La salida del controlador está especificada por tres cables casi siempre del mismo color (verde, amarillo, azul) y se puede observar que son de un calibre más grueso que los demás, porque la salida está en corriente alterna C.A y es Trifásica, la cuál va alimentar el motor Brushless.
- **INPUT D.C:** La entrada del controlador está especificada por dos cables de color rojo y negro, se observa que tienen un calibre más grueso que los demás y por aquí se alimenta el controlador con corriente continua D.C, que casi siempre está corriente proviene de una batería de un rango entre 12 y 48 [Voltios] depende de la potencia del motor Brushless que se maneje.
- **SENSOR (PAS):** Pedale Assisted Sensor o Sensor de Pedaleo Asistido es un sensor que permite accionar el motor Brushless cada vez que se da un pedaleo o se completa una vuelta en el disco del pedal, pudiendo así programarse el pedaleo asistido. Ejm: una vuelta de pedal y el (PAS) se programa para que haga otra, en total se estaría haciendo dos vueltas.
- **SENSOR DE TORQUE:** Este sensor está implementado en el acelerador (*Throttle*), cada vez que ejercemos un torque con el dedo pulgar, este gira de manera angular, cambiando la resistividad de la galga eléctrica implementada en el sensor y así permitiendo el mayor o menor paso de Corriente.



**Figura.** Terminales de Un Controlador.

El controlador tiene tres partes que lo conforman, la cuales se explicaran:

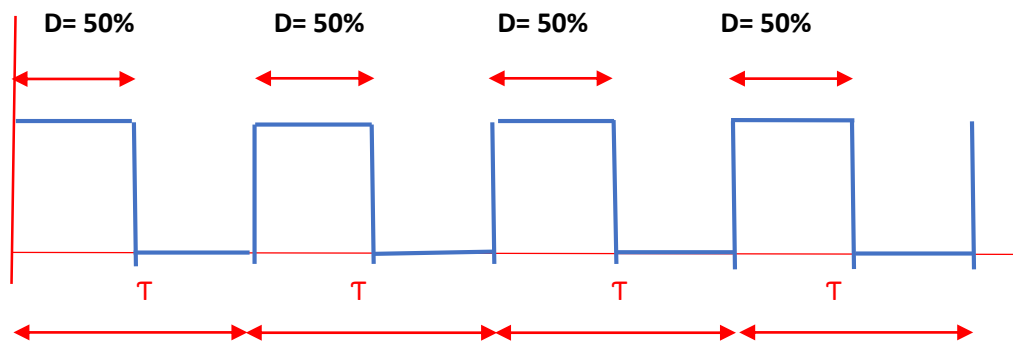
- (PWM) Modulación De Ancho De Pulso.
- Inversor (Convertidor DC-AC)
- Control de velocidad

## ANEXO B. MODULACIÓN POR ANCHO DE PULSO (PWM)

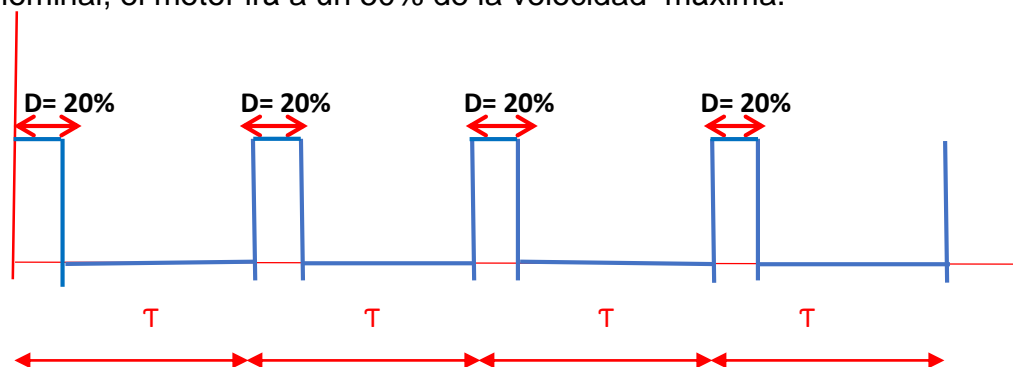
(Pulse Width Modulation) Es una técnica en la que se modifica el ciclo de trabajo ( $D$ ) de una señal periódica (una sinusoidal o cuadrada), ya sea para transmitir información a través de un canal de comunicaciones o para controlar la cantidad de energía que se envía a una carga.

El ciclo de trabajo de una señal periódica es el ancho relativo de su parte positiva en relación con el periodo.

El funcionamiento básico es simple, una serie de pulsos cuyo ancho es controlado por la variable de control. Es decir, que si la variable de control se mantiene constante o varía muy poco, entonces el ancho de los pulsos se mantendrá constante o variará muy poco respectivamente.



En esta figura podemos ver que la tensión continua equivale al 50% de la tensión nominal, el motor irá a un 50% de la velocidad máxima.



En esta figura podemos ver que la tensión continua equivale al 20% de la tensión nominal, el motor irá a un 20% de la velocidad máxima.

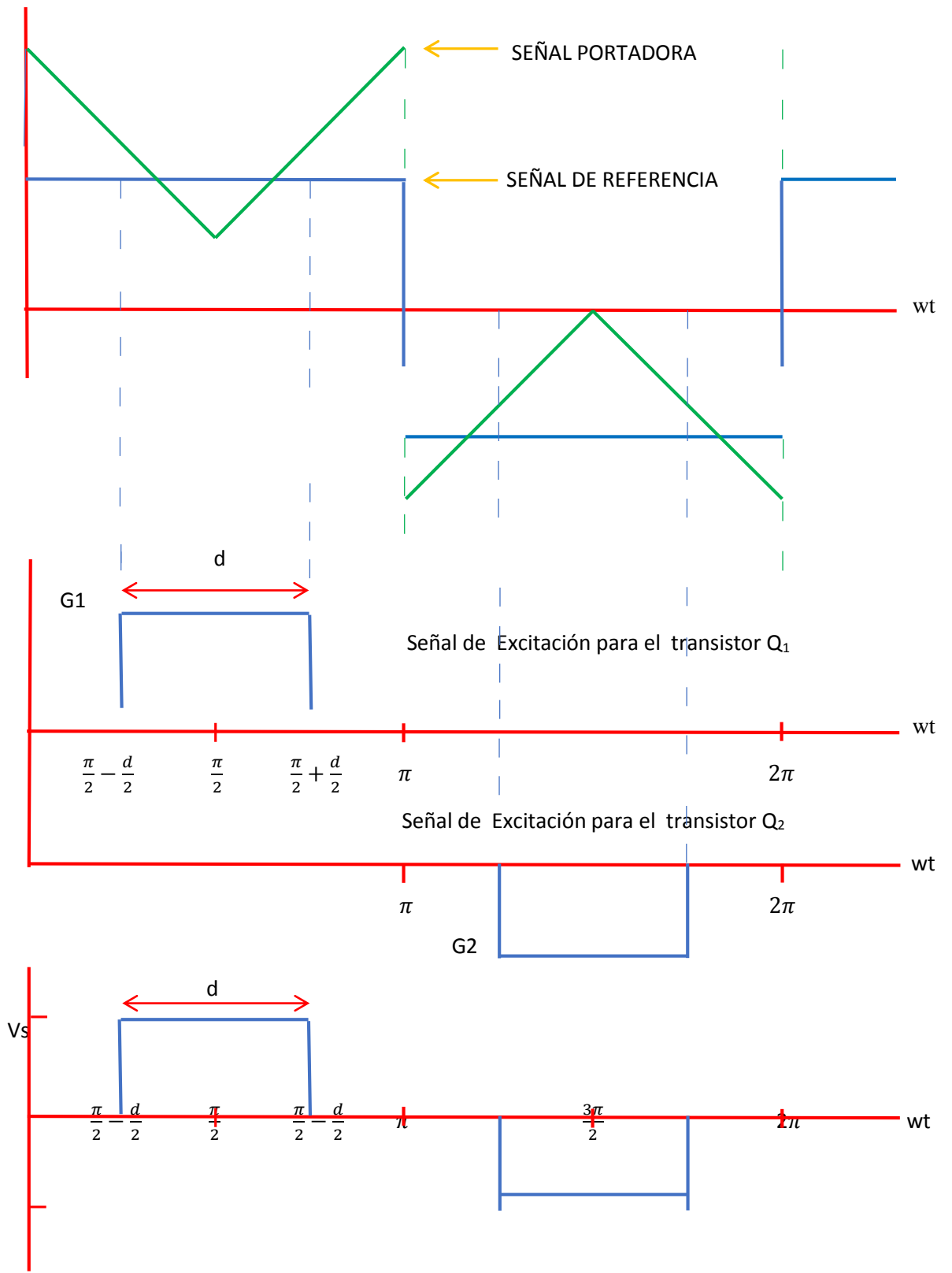
Expresado matemáticamente:

- $D$  es el ciclo de trabajo
- $t$  es el tiempo en que la función es positiva (ancho de pulso).
- $T$  es el periodo de la función.
- $D = \frac{t}{T}$

### **Tipos de Modulación**

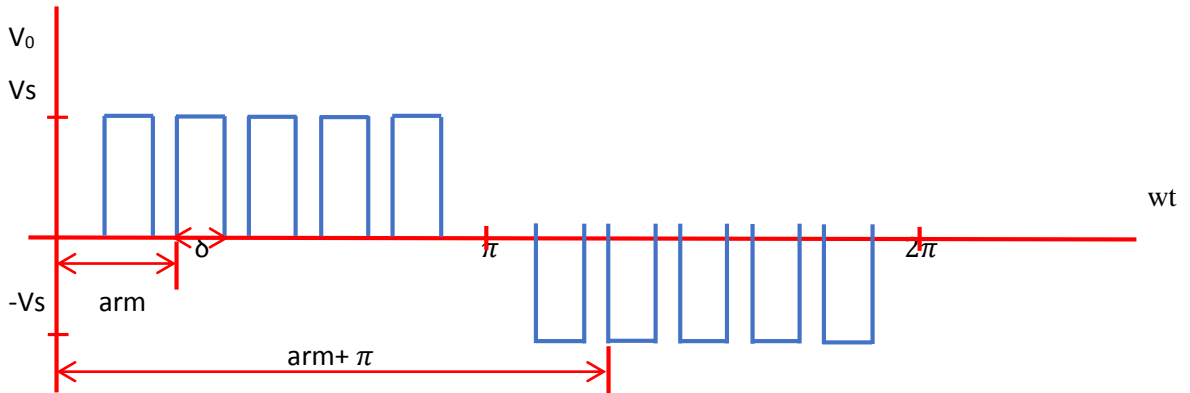
Modulación de un solo ancho de pulso:

En el control por modulación de un solo ancho de pulso, existe un solo pulso por cada medio ciclo, el ancho de pulso se hace variar, a fin de controlar el voltaje de salida del inversor. La figura muestra la generación de las señales de excitación y el voltaje de salida para los inversores monofásicos en puente completo.



### Modulación De Varios Anchos De Pulso:

Utilizando varios pulsos en cada medio ciclo de voltaje de salida, puede reducirse el contenido armónico.



Por medio de esta modulación se pretende reducir los armónicos

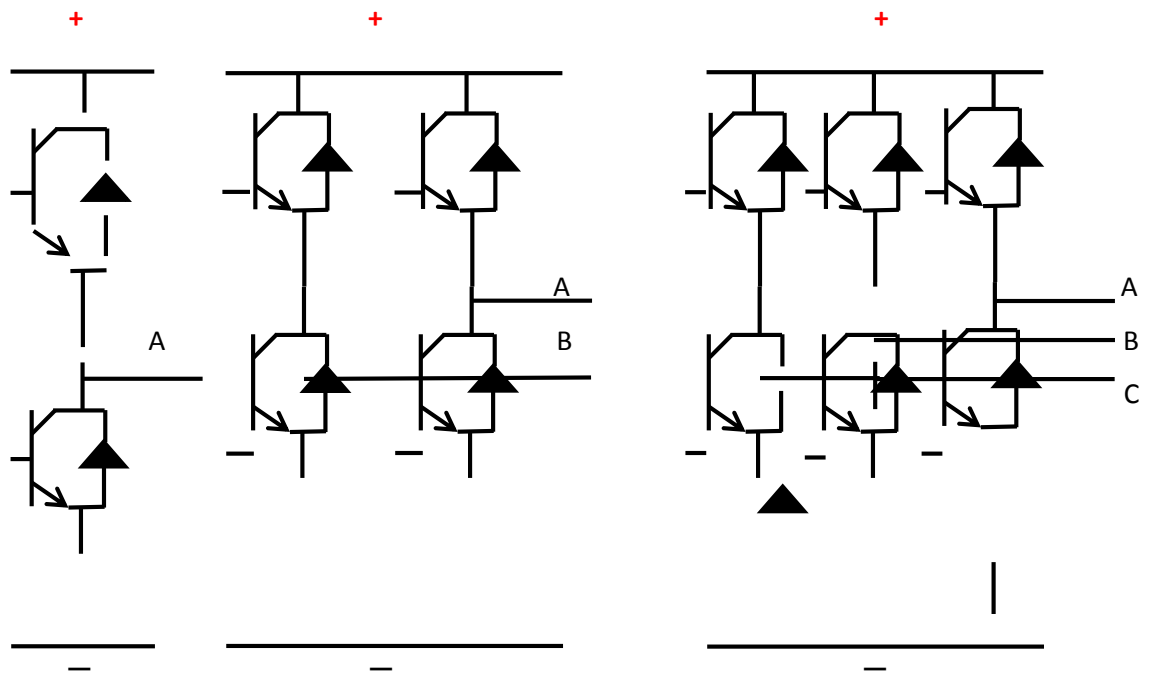
### Inversor

Los convertidores DC-AC son conocidos por inversores. Ellos pueden tener salida variable en voltaje y frecuencia. La forma de onda ideal de salida debería ser senoidal. Sin embargo en la práctica son no sinusoidales y poseen ciertos armónicos. Con la disponibilidad de dispositivos semiconductores de potencia con alta velocidad, los contenidos de armónicos del voltaje de salida pueden ser minimizados significativamente por la técnica de switcheo. En el presente documento se presenta en forma general una revisión cualitativa de las diferentes técnicas de modulación de ancho de pulso para el control de inversor.

## ANEXO C. TOPOLOGÍA DEL INVERSOR

La topología del inversor queda definida por el modo de conexión de los dispositivos de conmutación que conforman el puente. Cada rama (arm o leg) del puente consta de dos dispositivos de conmutación. Una o dos ramas – puente H - (dos o cuatro dispositivos de conmutación) sean empleados para puentes monofásicos y bifásicos. Tres ramas pueden ser conectadas para conformar un convertidor trifásico en configuración de puente de Graetz (seis dispositivos de conmutación) siendo este el de mayor uso, aunque pueden emplearse mayor número de ramas para aumentar la capacidad de conducción.

Figura 1. Topología de Inversores de una, dos y tres ramas.



La configuración más simple es el inversor monofásico, de medio puente, el cual requiere una fuente DC de tres conductores, sin embargo, los inversores trifásicos se utilizan normalmente en aplicaciones de alta potencia. Tres inversores

monofásicos de medio puente (o puente completo) pueden conectarse para formar un inversor trifásico, siempre que sus señales de puerta estén desfasadas  $120^\circ$ . Las configuraciones de seis dispositivos de switcheo, son los más empleados, pudiéndose aplicar señales de control: conducción a  $180^\circ$  o conducción a  $120^\circ$ , es decir, permitiendo la conducción por dos o tres dispositivos de switcheo respectivamente.

### **Control del voltaje de salida**

Algunas aplicaciones de inversores requieren de medios de control sobre el voltaje de salida. En la mayoría de esas aplicaciones el control es usualmente requerido a fin de proveer un ajuste continuo (*stepless*) del voltaje de salida. Los métodos de control pueden ser agrupados en tres grandes categorías:

- Control de voltaje suministrado al inversor.
- Control del voltaje entregado por el inversor.
- Control del voltaje dentro del inversor.

Hay un número de bien conocidos métodos de controlar el voltaje DC suministrado al inversor o del voltaje AC entregado por el inversor. Estos incluyen el uso de Chopper DC, amplificadores magnéticos, reguladores de inducción, rectificadores de fase controlado y transistores series o reguladores shunt. La principal desventaja de estos métodos es que la potencia entregada por el inversor es manejada dos veces, una vez por el control de voltaje DC o AC y otra por el inversor. Esto generalmente involucra más equipos que los que serían necesario si el control de voltaje es hecho dentro del inversor. El control de la salida del inversor puede ser logrado por la incorporación de controles de relación de tiempo dentro del circuito del inversor.