




## Parametrización de un motor fotovoltaico

### Parameterization of a photovoltaic motor

Yaqueline Garzón-Rodríguez<sup>1</sup>  Fernando Martínez-Santa<sup>2</sup>  Luis Hernando Laguna-Garzón<sup>3</sup>   
Diego Fernando Niño-Rodríguez<sup>4</sup> 

**Paracitarestartículo:** Y. Garzón-Rodríguez, F. Martínez-Santa, L. H. Laguna-Garzón, D. F. Niño-Rodríguez, "Parametrización de un motor fotovoltaico", Revista Vínculos, vol 18, no. 1, 39-52, 2021. <https://doi.org/10.14483/2322939X.20189>

**Recibido:** 15-03-2021 / **Aprobado:** 27-05-2021

**Resumen:** La radiación solar por ser una fuente de energía libre, se convierte en una candidata para ser utilizada en procesos de transformación de energía que brinde una solución energética para zonas no interconectadas, ya sea mediante generación distribuida o aislada. Esto conlleva al desarrollo y construcción de un prototipo de motor fotovoltaico que aprovecha principios de electricidad y electromagnetismo. Para su obtención, se parte de la construcción de un prototipo que permita identificar aspectos como la temperatura de funcionamiento, condiciones de iluminación, entre otros aspectos; en un entorno artificial mediante pruebas experimentales realizadas a sus componentes. A su vez se desarrollan simulaciones en el software COMSOL Multiphysics® que permiten mejorar el funcionamiento de su física.

De igual forma, para optimizar el comportamiento del motor éste se parametriza con el uso de sensores ubicados

tanto en su interior como en el exterior. A manera de aplicación se implementa un sistema de bombeo de agua, acoplado a una turbina para el aumento del caudal en su salida para el llenado de un tanque. Siendo esta una de las primeras aplicaciones documentadas en el ámbito académico para este tipo de motor.

**Palabras clave:** caudal, efecto fotoeléctrico, electromagnetismo, iluminación artificial, motor mendocino, pseudo-levitación, turbo-maquinaria.

**Abstract:** Solar radiation, as a free energy source, becomes a candidate to be used in energy transformation processes that provides an energy solution for non-interconnected areas, either through distributed or isolated generation. This leads to the development and construction of a photovoltaic motor prototype that takes advantage of the principles of electricity and electromagnetism. To obtain it, it starts with the construction of a prototype

- 1 Electrical Engineer, Distrital University, Colombia. magister in information and communications sciences, Distrital University, Colombia. Professor: Distrital University, Colombia. E-mail: [ygarzonr@org.es](mailto:ygarzonr@org.es)
- 2 Electronic Control and Instrumentation Engineer, Distrital University, Colombia. Master in Engineering, Andes University, Colombia. Professor: Distrital University, Colombia, Colombia. E-mail: [fmartinezs@udistrital.edu.co](mailto:fmartinezs@udistrital.edu.co)
- 3 Electrical Engineer, Distrital University, Colombia. Current position: Information Analysis Technologist, Incremental management leader WSP Colombia, Colombia. E-mail: [dfniñor@correo.udistrital.edu.co](mailto:dfniñor@correo.udistrital.edu.co)
- 4 Electrical Engineer, Distrital University, Colombia. Current position: Maintenance Assistant Technologist, Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, ESP, Colombia. E-mail: [hlagunag@correo.udistrital.edu.co](mailto:hlagunag@correo.udistrital.edu.co)

that identifies aspects such as operating temperature, lighting conditions, among other aspects; in an artificial environment through experimental tests carried out on its components. At the same time, simulations are developed in the COMSOL Multiphysics® software that allow to improve the functioning of its physics.

In the same way, to optimize the behavior of the motor, it is parameterized with the use of sensors located both inside and outside. As an application, a water pumping system is implemented, coupling a turbine to increase the flow at its outlet for filling a tank. This being one of the first applications documented in the academic field for this type of engine.

**Keywords:** flow rate, photoelectric effect, electromagnetism, artificial lighting, mendocino motor, pseudo-levitation, turbo-machinery.

## 1. Introducción

El concepto de motor fotovoltaico o motor de energía solar es descrito por primera vez en 1959 por W. A. Marrison [1] y patentado de otras maneras [2 – 7]. En 1994, Spring L. introdujo un sistema de rodamiento magnético que permite la pseudo-levitación del rotor respecto al estátor en una disposición horizontal nombrada “Larry Spring’s Magnetic Levitation Mendocino Brushless Solar Motor”, comúnmente denominado “Motor Mendocino”. Sin embargo, este tipo de motor se ha investigado poco en su funcionamiento por el ámbito académico [9-12], con implementación de mejoras sobre el rodamiento magnético [13-14] y una patente en aplicación de generación eléctrica [15].

El prototipo de motor fotovoltaico construido es similar en su estructura a un motor de corriente continua, con diferencia en que el rotor se encuentra en pseudo-levitación sobre un rodamiento magnético pasivo y con celdas solares sobre su superficie, que proveen de corriente eléctrica a las bobinas de la armadura. Los

campos electromagnéticos producidos interactúan con imanes fijos que hacen las veces de estátor provocando su rotación y con ella un proceso de auto-conmutación en la alimentación de las bobinas que mantiene el movimiento constante frente a la presencia de una fuente de luz, convirtiendo así, la energía lumínica en mecánica sin el uso de escobillas, baterías ni electrónica de potencia adicional.

Para un mayor aprovechamiento de los sistemas de solares, es indispensable un adecuado dimensionamiento de cada uno de los componentes que los conforman [19]. Por lo cual, en la primera parte del documento presenta la estructura y principio de funcionamiento del motor fotovoltaico en el que se basa el desarrollo del prototipo. Asimismo, está dedicada al proceso de experimentación para la caracterización de celdas solares, selección de materiales, diseño de la estructura del rotor, diseño de bobinas, selección de eje e imanes para el estátor y rodamiento, así como el diseño y construcción de su estructura. Para concluir se hace referencia a las mediciones en funcionamiento del primer prototipo.

La segunda sección consta de la simulación en estado estacionario del campo magnético y electromagnético por secciones del motor en COMSOL Multiphysics® y parametrización del motor en funcionamiento para identificar puntos de optimización. Por último, la tercera sección presenta la implementación del motor en una aplicación de turbo-maquinaria para el aumento de caudal de agua en un sistema de llenado de tanque en un entorno de iluminación artificial.

Como uno de los aportes principales del trabajo realizado, se destaca el aprovechamiento de la energía mecánica rotacional producida por el motor en un sistema hidráulico de bombeo de agua. Lo anterior lo convierte en un referente para el desarrollo de nuevos prototipos y procesos de optimización de motores tipo mendocino y su aplicación en procesos industriales o de generación eléctrica.

## 2. Estructura y diseño del motor

### 2.1. Estructura

En la Figura 1 se muestran los elementos constitutivos del motor, entre ellos: un imán que genera un campo magnético constante, (ubicado en la base del motor y hace las veces de estátor), un rotor con estructura en forma de prisma (en su interior bobinas alimentadas por las celdas solares rectangulares ubicadas sobre la superficie), un rodamiento magnético pasivo compuesto por un eje circular diamagnético e imanes en forma de disco (en la base) y anillo (en el soporte) en configuración triangular que mantienen al rotor en pseudo-levitación.

En uno de sus extremos se ubica una superficie lisa que sirve de pared para evitar que la fuerza de empuje producida por la rotación desestabilice el rotor.

### 2.2. Principio de funcionamiento

Un conductor de longitud  $l$  por el que circula una corriente  $I$ , en un campo magnético constante y uniforme  $B$ , experimenta sobre él una fuerza magnética  $F$  descrita por la ecuación 1, conocida como Ley de Laplace.

$$\vec{F} = I\vec{l} \times \vec{B} \quad (1)$$

La Figura 2 muestra los vectores  $\vec{F}_1$  y  $\vec{F}_2$  de la fuerza resultante en cada bobina durante un giro, que es máxima sobre los conductores cuando los vectores de fuerza y campo magnético son perpendiculares entre sí, provocando que el rotor gire manteniendo la dirección de la fuerza y conmutando la posición de las celdas.

Figura 1. Estructura de motor mendocino. [9]

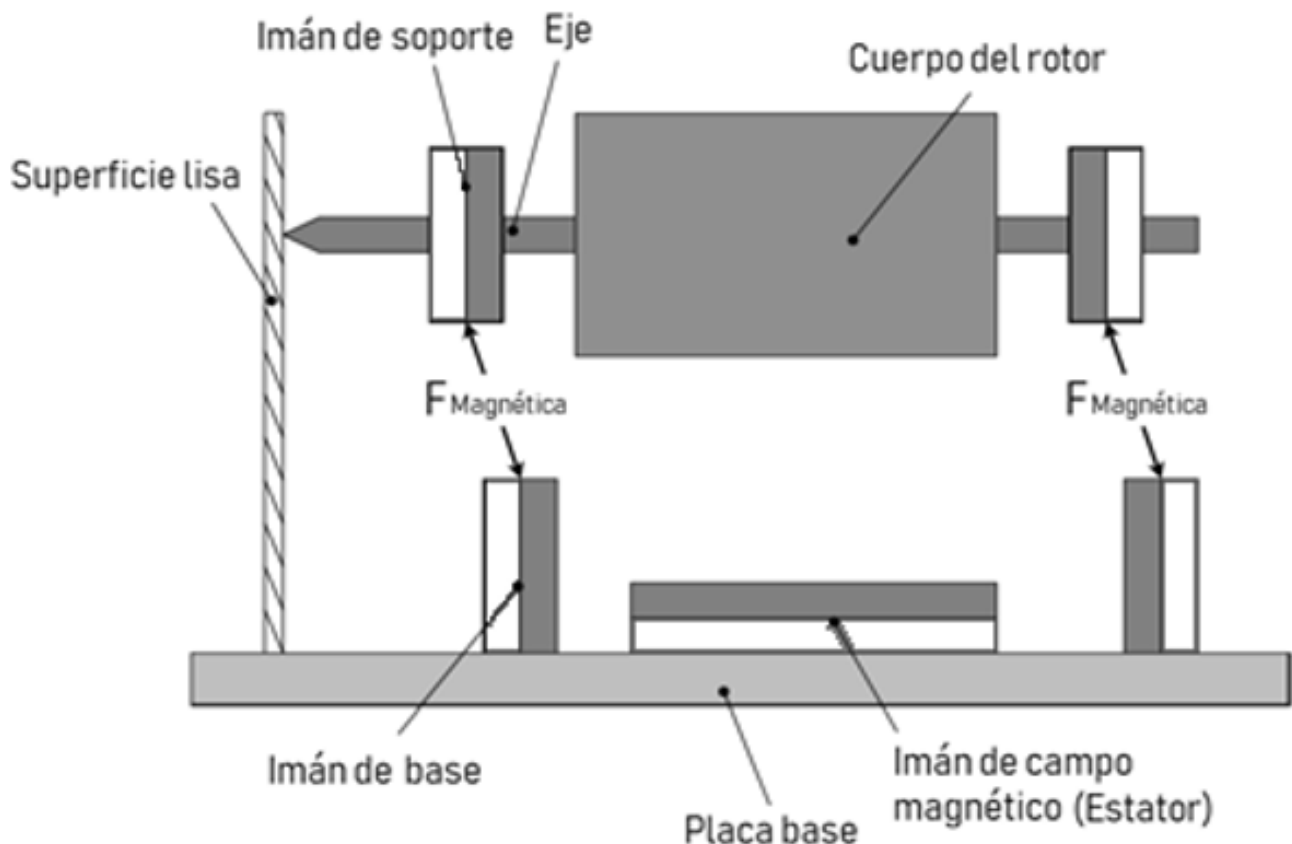


Figura 2. Vectores de fuerza en una bobina en un giro completo. [14]

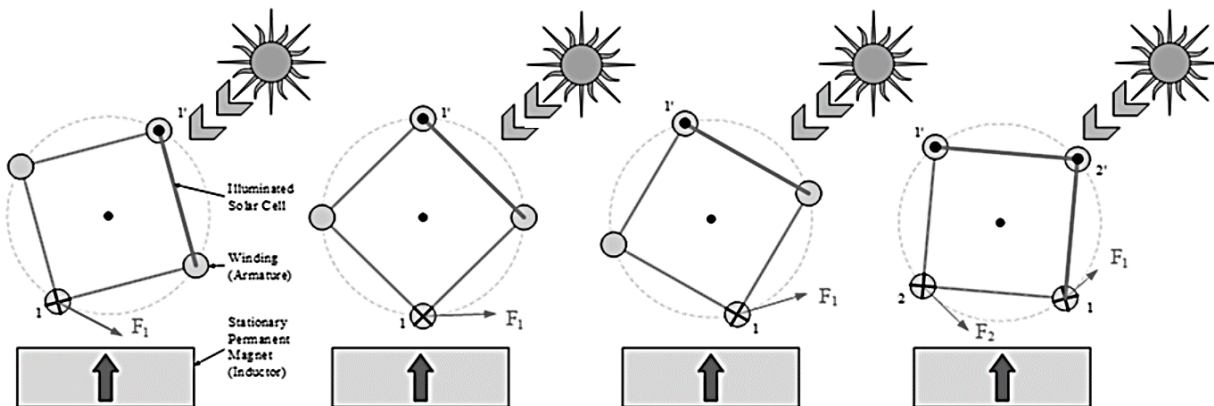
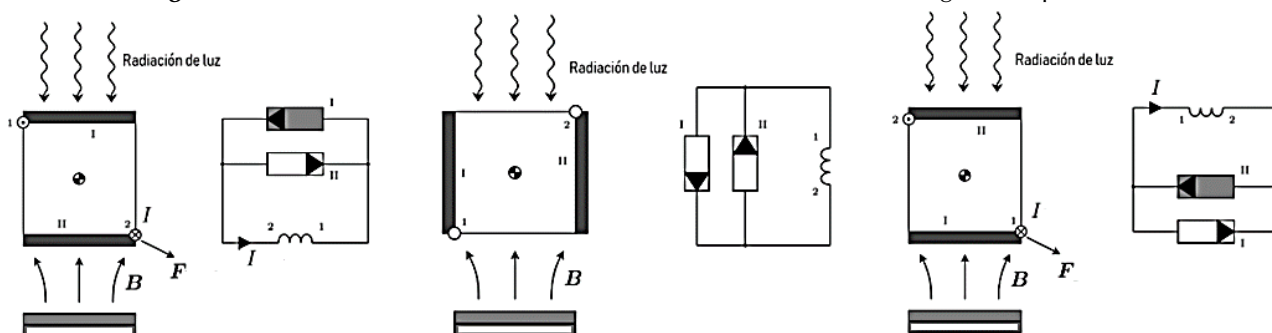


Figura 3. Proceso de conmutación de corriente en una bobina en un giro completo. [9]



El proceso de auto-conmutación se realiza como lo muestra la Figura 3, conectando en antiparalelo a una bobina dos paneles I y II, ubicados en posición opuesta sobre la estructura del rotor.

### 2.3. Caracterización de celdas solares

El prototipo del motor se desarrolla en un ambiente de iluminación artificial controlado a causa de las condiciones atmosféricas variables cuando se realizan mediciones con radiación solar.

#### 2.3.1. Selección de celdas

El procedimiento de selección se realiza considerando un área menor a 100 cm<sup>2</sup> y de silicio monocristalino, esto con el fin de facilitar la construcción del rotor y su disponibilidad en el mercado. Las características entregadas por los fabricantes para cada tipo de celda se relacionan en la Tabla 1.

Tabla 1. Características de las celdas solares.

Nombre	Dimensiones (mm x mm x mm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Voltaje (V)	Corriente (mA)	Potencia (mW)
Celda 1	80 x 45 x 2	36	6	80	480
Celda 2	50.9 x 100.7 x 2	51,12	4,5	100	450
Celda 3	90 x 85 x 2	83,3	12	50	600
Celda 4	100 x 60 x 2	60	9	70	630

Fuente: Elaboración propia

### 2.3.2. Fuentes de iluminación

El entorno de iluminación artificial tiene como finalidad simular en su medida la radiación solar para poder desarrollar pruebas de una manera controlada. Para ello,

se seleccionan bombillas de tecnología: incandescente, fluorescente, halógena y LED. Las características entregadas por los fabricantes para cada tipo de fuente se muestran en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Características eléctricas de fuentes de iluminación artificial.

Característica	Tecnología			
	Incandescente	Fluorescente	Halógena	LED
Fabricante	Everlighting	ROJO	ILUMAX	ASTRO Bright
Potencia (W)	100	22	53	3,5
Voltaje ( $V_{AC}$ )	120	110 – 130	120	90 – 135
Potencia lumínica (lm)	1070	1080	830	210
Temperatura del color (K)	-	6500	3000	6400

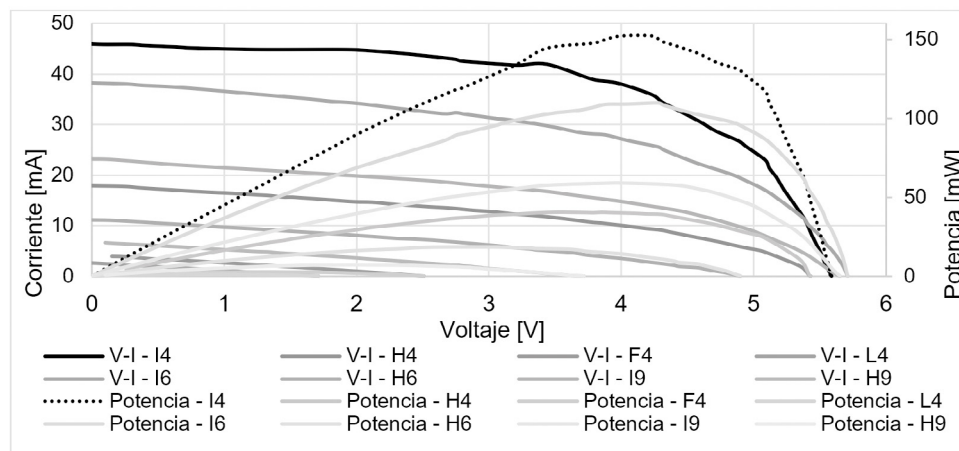
Fuente: Elaboración propia

### 2.3.3. Proceso de caracterización

La operación de una celda solar conectada a una carga se determina por medio de la curva característica I vs V y curva característica PMP. Para determinar las curvas se realizan mediciones de voltaje y corriente en una carga variable en un entorno artificial construido para

permitir el cambio de celda, bombilla y la variación de la distancia de separación de la fuente y celda entre 9, 6 y 4 cm. La Figura 4 muestra las curvas características obtenidas para la celda tipo 1, donde I, H, F y L corresponden al tipo de fuente mientras 4, 6 y 9 corresponde a la distancia de separación.

**Figura 4.** Curvas características de la celda tipo 1 para los tipos de fuente de iluminación y distancia de separación.

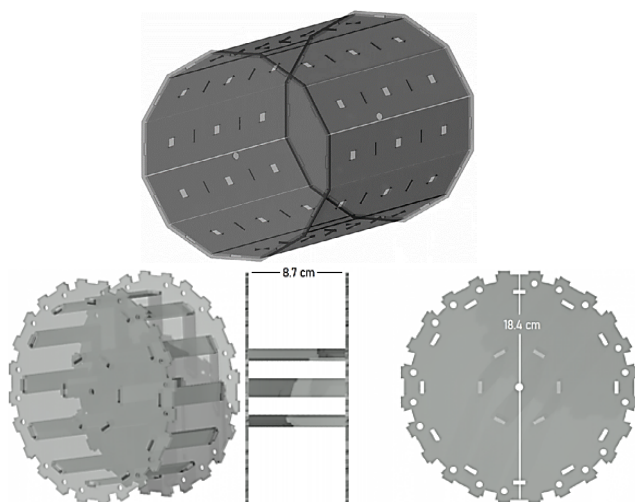


Fuente: Elaboración propia.

## 2.4. Rotor

El diseño del rotor es condicionado por el tamaño de la celda seleccionadas anteriormente. Se establece la forma de prisma dodecagonal mostrada en la Figura 5 puesto que su forma cilíndrica proporciona mejor estabilidad durante la rotación y un mayor aprovechamiento de la luz; además, en su interior cuenta con una estructura de soporte sobre la cual se instalan baterías y sensores. El material seleccionado fue acrílico de 4 mm dada su disponibilidad en mercado, facilidad para el corte láser, mantenimiento y operación a la intemperie.

Figura 5. Diseño de la estructura del rotor



Fuente: Elaboración propia.

## 2.5. Imanes de rodamiento magnético y estátor

Los imanes permiten la pseudo-levitación y proveen el campo magnético que interactúa con la corriente de las bobinas produciendo la rotación del motor. El material seleccionado es de neodimio (NdFeB) dada su alta remanencia y coercitividad respecto a los imanes de ferrita del mismo tamaño. Para su selección se toman cuatro muestras por tipo con base en las características del fabricante [16–18], se simula su comportamiento en COMSOL Multiphysics®. La Tabla 3 presenta los imanes seleccionados.

## 2.6. Bobinas

Definida la fuente de iluminación del entorno artificial, el tipo de celda y la forma de rotor se realiza la caracterización descrita la sección 2.3.3 para cada panel – compuesto por tres celdas conectadas en paralelo – en un entorno artificial con sistema de ventilación. La Tabla 4 presenta los valores obtenidos. Para el diseño de las bobinas se observa que la resistencia promedio de la carga de los paneles es de 26,2  $\Omega$  y la longitud por vuelta de la bobina, definida por la estructura interna del rotor es de 0,54 m. Asimismo, para la selección del calibre del conductor de cobre, se evalúan aspectos como la capacidad de corriente, el número de vueltas y la masa total de las bobinas. La Tabla 5 presenta las características promedio por bobina.

Tabla 3. Dimensiones y grado de imanes seleccionados.

Forma y dimensiones	Medición	Forma y dimensiones	Medición	Forma y dimensiones	Medición
<b>Imán en forma de anillo</b>		<b>Imán en forma de disco</b>		<b>Imán en forma de bloque</b>	
Diámetro exterior (mm)	25	Diámetro (mm)	25	Largo (mm)	47
Diámetro interior (mm)	9	Alto (mm)	10	Ancho (mm)	21
Alto (mm)	4	Grado	N35	Altura (mm)	10
Grado	N35			Grado	N45

Fuente: Elaboración propia.



**Tabla 4.** Parámetros característicos por panel para un entorno artificial con ventilación.

Panel	Voltaje de circuito abierto [V]	Corriente de corto circuito [mA]	Voltaje máximo [V]	Corriente máxima [mA]	Resistencia de carga [ $\Omega$ ]	Factor de forma	Potencia máxima [mW]
1	5,81	199,80	4,32	162,10	26,65	0,60	700,27
2	5,65	179,70	4,20	146,97	28,58	0,61	617,29
3	5,73	192,80	4,28	170,60	25,09	0,66	730,17
4	5,41	182,40	4,00	159,50	25,08	0,65	638,00
5	5,44	188,00	4,10	163,00	25,15	0,65	668,30
6	5,54	192,20	4,00	163,80	24,42	0,62	655,20
7	5,66	205,30	4,31	160,20	26,90	0,59	690,46
8	5,62	189,10	4,34	152,30	28,50	0,62	660,98
9	5,80	191,10	4,52	170,20	26,56	0,69	769,30
10	5,83	192,20	4,30	163,00	26,38	0,63	700,90
11	5,76	195,80	4,37	158,30	27,61	0,61	691,77
12	5,80	192,20	4,30	176,60	24,35	0,68	759,38

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 5.** Características de bobina promedio del rotor.

Calibre [AWG]	Diámetro [mm]	Capacidad de corriente [A]	Número de vueltas	Longitud total [m]	Masa de bobinas [kg]
26	0,4049	0,50	366	198,44	1,38

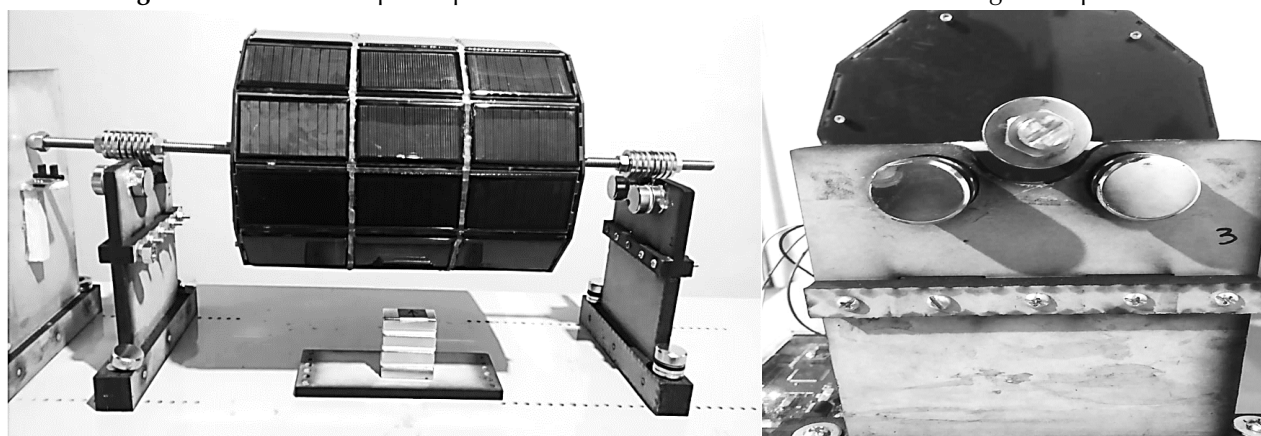
Fuente: Elaboración propia.

## 2.7. Construcción del prototipo

El ensamble del rotor se efectúa sin el uso de elementos de fijación de material ferromagnético, en su lugar el diseño de su estructura con pestañas, perforaciones

y corte láser permite un ensamble de las piezas a presión. La estructura que soporta el rodamiento es de material MDF (fibropanel de densidad media). La Figura 6 presenta el ensamble del prototipo del motor en pseudo-levitación.

**Figura 6.** Ensamble de prototipo de motor fotovoltaico sobre rodamiento magnético pasivo.



Fuente: Elaboración propia.

## 2.8. Parametrización

Una vez puesto en funcionamiento se procede a parametrizar el motor realizando las mediciones posibles

de variables eléctricas y mecánicas. La Tabla 6 presenta las características del prototipo base del motor, así como del sistema de iluminación artificial y ventilación.

**Tabla 6.** Características del motor fotovoltaico y sistema de iluminación.

Característica	Descripción
Masa del rotor	2.83 (kg)
Temperatura máxima sobre superficie de celdas	50,9 (°C)
Eje	Varilla roscada de acero inoxidable 500 X 9,52 (mm)
Velocidad de rotación	116 (RPM)
Corriente promedio máxima por bobina	167,02 (mA)
Voltaje promedio máximo por panel	4,34 (V)
Rodamiento magnético	16 imanes tipo anillo 25 X 9 X 4 (mm) grado N35 16 imanes tipo disco 25 X 10 (mm) grado N35 Distancia de separación 45 (mm) de centro a centro de los imanes base del rodamiento
Estátor	4 imanes tipo bloque 47 X 21 X 10 (mm) grado N45
Desplazamiento horizontal máximo del eje	3 mm
Desplazamiento vertical máximo del eje	0 mm
Fuente de iluminación artificial	3 bombillas Everlighting 100 (W), 120 (V)
Iluminancia promedio	15619,28 (lx)
Sistema de ventilación	6 ventiladores 120 x 25 (mm), 12 (V), 0.15 (A)
Eficiencia en conversión de potencia eléctrica	3,08 % - 9.24 (W) rotor; 300 (W) fuente de iluminación

Fuente: Elaboración propia.



### 3. Simulaciones

Para visualizar el comportamiento tridimensional de los fenómenos electromagnéticos presentes en el motor se requiere el uso del software COMSOL Multiphysics®. Es importante mencionar que el prototipo construido no es un modelo convencional de motor eléctrico. De esta manera, se hace necesario realizar un análisis individual para el comportamiento del rodamiento magnético, para el rotor y para estátor.

#### 3.1. Campo magnético de rodamiento

Para llevar a cabo la simulación se requiere conocer parámetros como: densidad de flujo remante ( $B_r$ ) permeabilidad ( $\mu$ ) y susceptibilidad magnética ( $x_m$ ) del material de los imanes, unos de estos parámetros son entregados por el fabricante [16-17], otros se deben calcular, como por ejemplo la permeabilidad ( $\mu$ ) y susceptibilidad magnética ( $x_m$ ) que se obtiene mediante (2) y (3) respectivamente.

$$\mu = 4\pi \times 10^{-7} (\text{H/m}) \cdot 7000 = 0.008796459 (\text{H/m}) \quad (2)$$

$$x_m = 7000 - 1 = 6999 \quad (3)$$

La Tabla 7 presenta los valores con el intervalo de densidad de flujo e intensidad de campo magnético de los imanes implementados en el rodamiento.

#### 3.2. Campo magnético del estátor

Al igual que se hace para obtener la simulación del rodamiento para el estátor se deben contemplar las características magnéticas entregadas por el fabricante [18], y el rodamiento y su geometría descritos en la Tabla 3. El intervalo de densidad de flujo e intensidad de campo magnético del estátor se relacionan en la Tabla 7.

#### 3.3. Campo magnético en el rotor

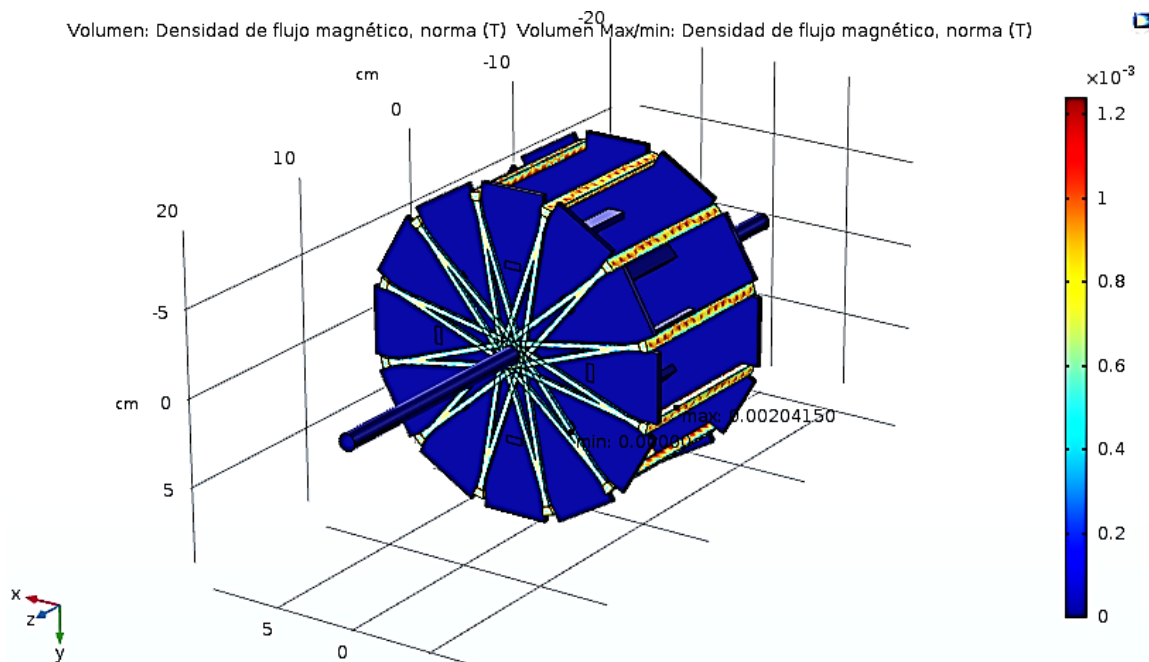
La simulación de la densidad de flujo e intensidad del campo magnético del rotor requiere la importación de la geometría tridimensional de la estructura interna del rotor con su bobinado y el uso de la física "Campos electromagnéticos". La Figura 7 muestra la simulación de la densidad de campo magnético sobre la superficie de los conductores que al relacionarse con el campo magnético provocan una fuerza resultante que produce la rotación del motor.

**Tabla 7.** Características magnéticas simuladas del rodamiento magnético y estátor.

Característica	Imanes tipo anillo	Imanes tipo disco	Imanes tipo bloque
Densidad de flujo magnético	0,036 – 1,03 (mT)	0,038 – 1,34 (mT)	0,034 – 2.18 (mT)
Intensidad de campo magnético	136,29 – 136,44 (A/m)	136,34 - 136.43 (A/m)	154.41 – 154,61 (A/m)

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 7.** Simulación de densidad campo magnético en el rotor.



Fuente: Elaboración propia.

La magnitud de la densidad magnética simulada por bobina es de 2.04 (mT) mientras que la intensidad de campo magnético  $H$  se determina mediante (4).

$$|H| = \frac{B}{\mu_0} = \frac{2.041 \text{ (mT)}}{4 \pi \times 10^{-7} \text{ (H/m)}} = 1624.57 \text{ (A/m)} \quad (4)$$

## 4. Implementación

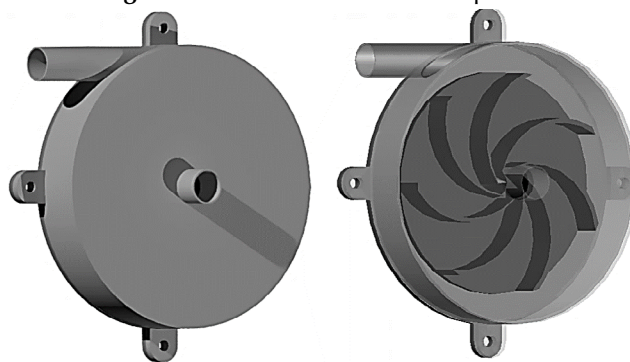
El acople de un motor fotovoltaico a una maquina hidráulica permite utilizar la radiación de la fuente de iluminación añadiendo energía a un fluido, dando como resultado un incremento de presión de éste. Este principio también representa una aplicación para este tipo de motor experimental.

### 4.1. Bomba

Debido a que se desconoce el momento de fuerza o torque del motor y las características de pseudo-levitación del eje, al igual que la baja velocidad rotacional

comparada con motores eléctricos de baja potencia tampoco es posible acoplar una bomba convencional por las características nominales de revoluciones y torque que requieren para su correcto funcionamiento. Por lo anterior se diseña un prototipo sencillo de bomba centrífuga mostrada en la Figura 8, impresa en 3D en material ABS con un eje roscado de acero inoxidable de 3/8" de 2,5 (cm) de longitud, un diámetro de 12,7 (mm) tanto en la entrada como en la descarga para la tubería y un impulsor de siete álabes inclinados hacia atrás con un ancho igual a lo largo de su curvatura.

**Figura 8.** Diseño de bomba e impulsor.

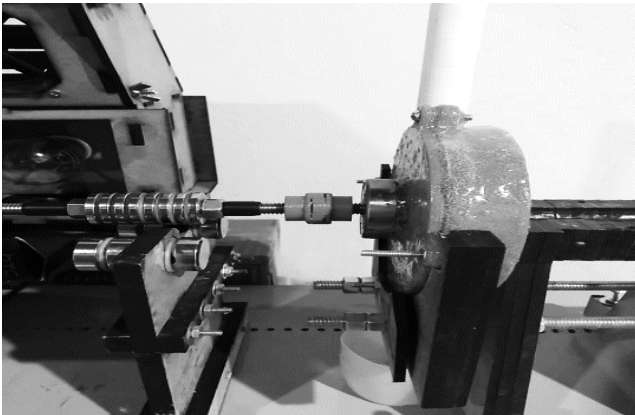


Fuente: Elaboración propia.

## 4.2. Acople

El mecanismo de acople entre el motor fotovoltaico y la bomba se realiza por medio de un par de piezas diseñadas e impresas en 3D que en sus extremos se fijan los ejes del motor y la bomba como se aprecia en la Figura 99. Para su acople es necesario nivelar de forma precisa el eje de la bomba a la altura de pseudo-levitación del eje del motor y fijar un rodamiento mecánico a la carcasa de la bomba para ayudar a la rotación del impulsor. Para minimizar la presencia de fugas de agua en las uniones de la bomba se recubre su superficie con una capa de silicona líquida. Adicionalmente la bomba se encuentra fija a una estructura de MDF que permite el ajuste de nivel de los ejes.

**Figura 9.** Acople mecánico entre el motor fotovoltaico y la bomba.

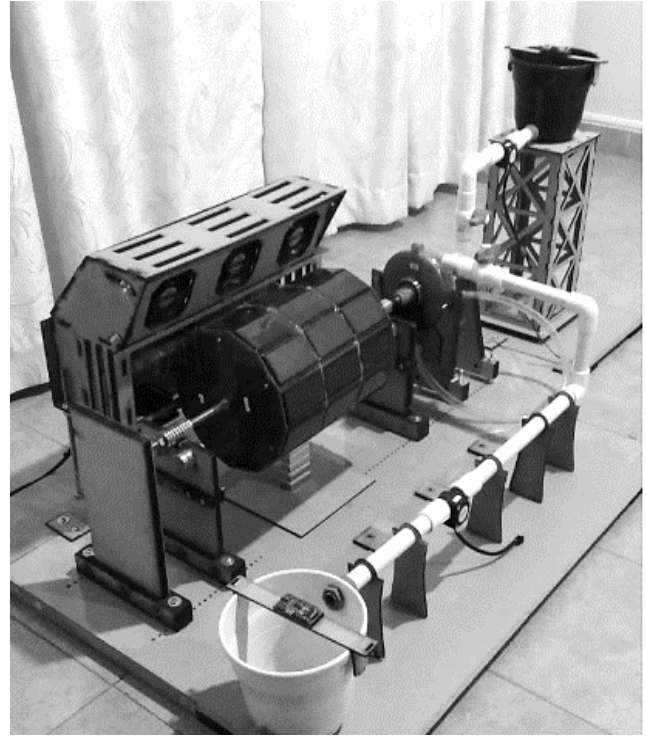


Fuente: Elaboración propia.

## 4.3. Sistema de tubería

El sistema de tubería implementado es el mostrado en la Figura 10. Realiza la descarga de agua desde un tanque ubicado a 15 (cm) sobre el nivel de referencia de entrada de la bomba hacia un tanque con una altura de llenado de 15 (cm) por debajo del nivel de referencia. El agua es conducida a través tubería, válvulas y accesorios de diámetro 1/2" en material PVC. El caudal máximo medido sin el funcionamiento de la bomba fue de 4,88 litros/minuto (L/min).

**Figura 10.** Sistema de tubería hidráulico.

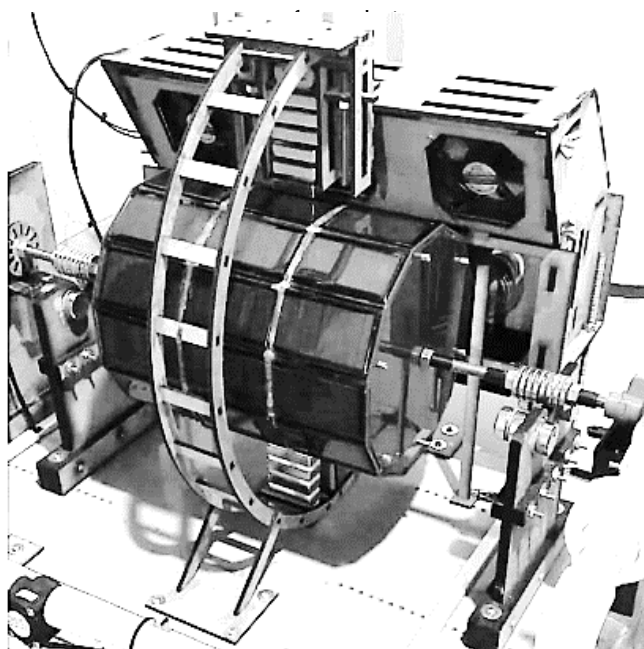


Fuente: Elaboración propia.

## 4.4. Turbo-maquinaria

El proceso de funcionamiento de la motobomba con el prototipo inicial de motor fotovoltaico (ver Figura 6) no presenta un aumento significativo de caudal en salida de la bomba debido a que el flujo de agua por la bomba reduce la velocidad de rotación del motor hasta 80 (RPM). Para mejorar el rendimiento del motor se modifica la configuración del estátor, adicionando dos imanes al estátor ubicado en la parte inferior e incluyendo un arco donde se soporta un nuevo bloque de estátor, ubicado en la parte superior del rotor como lo muestra la Figura 11. Esta modificación permite aumentar la velocidad y torque de motor puesto que en comparación con la representación de la Figura 2 se aumenta a dos las zonas por giro donde se genera la fuerza magnética que produce la rotación.

**Figura 11.** Modificación estructural del estátor del



Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 8 presenta las características del sistema de turbo-maquinaria en un ambiente de iluminación artificial y ventilación.

**Tabla 8.** Características del sistema de bombeo en un entorno de iluminación artificial.

Característica	Descripción
<b>Velocidad de rotación</b>	120 (RPM)
<b>Tiempo de aceleración hasta velocidad nominal</b>	1'5"
<b>Estátor</b>	12 imanes tipo bloque 47 X 21 X 10 (mm) grado N45
<b>Caudal máximo sin turbo-maquinaria</b>	4,88 (L/min)
<b>Caudal máximo con turbo-maquinaria</b>	5,69 (L/min)

Fuente: Elaboración propia.

## 4.5. Sensores

La visualización en tiempo real de variables presentes durante el funcionamiento de bombeo es fundamental para entender su comportamiento es por ello que el sistema cuenta con diferentes tipos de sensores compatibles con la plataforma de desarrollo Arduino: sensor de voltaje FZ0430, sensor ultrasónico HC-SR04, sensor de flujo YF-S201, sensor de velocidad HC-020K, sensor de temperatura LM35 y sensor de iluminancia BH1750. La adquisición de todas las variables se realiza a través de tarjetas Arduino Mega 2560 y Arduino nano, y su visualización es a través de pantallas LCD.

## 5. Conclusiones

El desarrollo de pruebas del funcionamiento del motor sin carga y como aplicación de turbo-maquinaria no se efectuó en un ambiente de iluminación natural dado que el diseño de las bobinas, configuración del rodamiento magnético y estátor, se realiza para un entorno de iluminación artificial.



La simulación en COMSOL Multiphysics® del motor fotovoltaico implica el uso simultáneo de “campos magnéticos, sin corriente” para los imanes permanentes y “campo magnético” para las bobinas, generando conflictos en su solución, adicional a que el tipo de motor implementado no corresponde en su construcción con modelos de motores convencionales.

La implementación del motor fotovoltaico en pseudo-levitación es posible en procesos de bombeo de líquidos no viscosos o en sistemas de generación eléctrica u otro proceso aplicado que requiera un bajo torque en el eje del motor.

## Recomendaciones

Para futuros desarrollos del motor fotovoltaico es recomendable hacer medición del campo magnético en las bobinas con y sin el sistema de ventilación, como también en los imanes de neodimio, con un sensor de efecto hall junto con una tarjeta de adquisición de datos, así como se lo presenta el artículo “Detección de posición a partir de la medición de un campo magnético” [20].

## Referencias

- [1] W. A. Marrison, “Apparatus for converting radiant energy to electromechanical energy”, U.S., Patent 2919358, Dec. 29, 1959. [En línea]. Disponible en: <https://patentimages.storage.googleapis.com/e7/ce/c2/f8074398301da9/US2919358.pdf>
- [2] D. M. Chapin, C. S. Fuller and G. L. Pearson, “Solar energy converting apparatus”, U.S., Patent US2780765, Feb. 5, 1957. [En línea]. Disponible en: <https://patentimages.storage.googleapis.com/36/ee/af/d21dacd3884160/US2780765.pdf>
- [3] H. E. Hall, “Solar motor”, U.S., Patent US3296469, Ene. 3, 1967. [En línea]. Disponible en: <https://patentimages.storage.googleapis.com/7e/58/b3/09cf657161e51f/US3296469.pdf>
- [4] B. Sepp, “Rotating advertising device”, U.S., Patent US3325930, Ene. 20, 1967. [En línea]. Disponible en: <https://patentimages.storage.googleapis.com/2e/14/de/57d7f191d20af2/US3325930.pdf>
- [5] Y. Nakamats, “Apparatus for converting radiant energy such as light or heat directly into turning force”, Japón, Patent US4634343, Ene. 6, 1987. [En línea]. Disponible en: <https://patentimages.storage.googleapis.com/78/4e/a0/414270d9bad0e0/US4634343.pdf>
- [6] H. Izawa, “Solar Energy Motor”, Japan. Patent 4751413, Jun. 14, 1988. [En línea]. Disponible en: <https://patentimages.storage.googleapis.com/3f/8b/a3/9e59494a100d1e/US4751413.pdf>
- [7] G. J. Shea, “Solar energy magnetic resonance motor”, U.S., Patent US5408167, Abr. 18, 1995. [En línea]. Disponible en: <https://patentimages.storage.googleapis.com/77/c4/f7/c12b523e12bfcd/US5408167.pdf>
- [8] A. Coty, “Automatically switched photovoltaic motor”, Francia, Patent WO2010082007A3, Jul. 22, 2010. [En línea]. Disponible en: <https://patentimages.storage.googleapis.com/36/8f/25/4c5399bdbc34a4/WO2010082007A3.pdf>
- [9] W. Amrhein, H. Mitterhofer, E. Marth, G. Bramerdorfer, “Aufbau eines Mendocino-Motors”, Ene 2018 [En línea]. Disponible en: <http://www.bis0uhr.de/projekte/magnet/projektseminar.pdf>
- [10] T. Kornher, M. Noebels, J. Roeller, S. Schwieger, F. Weller, “Mendocino-Motor”, Feb 2018 [En línea]. Disponible en: [https://ap.physik.uni-konstanz.de/projektpraktikum/PP2011/Bericht\\_Mendocinomotor.pdf](https://ap.physik.uni-konstanz.de/projektpraktikum/PP2011/Bericht_Mendocinomotor.pdf)
- [11] Z. Novák, M. Hofreiter. “Mendocino motor and a different approaches to its control”, Proceedings of

- 15th International Conference MECHATRONIKA, Prague, pp. 1-6, 2012. [En línea]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6415075>
- [12] C.M. Estupiñan, J.P. Puerto-Reyes, M. A. Beltrán, “Desarrollo de un motor mendocino como herramienta de enseñanza en la aplicación de energías renovables y generación de alternativas energéticas”, Revista Loggin, vol. 1, no. 1, pp. 78-89, 2017.
- [13] K. Berger, et al, “Solar Electric Motor on Superconducting Bearings: Design and Tests in Liquid Nitrogen” en IEEE sobre aplicaciones de superconductividad, vol. 27, no. 4, pp. 1-5, Jun. 2017, <https://doi.org/10.1109/TASC.2016.2642140>
- [14] Fawzi Boufatah. “Réalisation d’un moteur à énergie solaire sur paliers supraconducteurs”, 2016, hal-01824246. [En línea]. Disponible en: <https://hal.univ-lorraine.fr/hal-01824246/document>
- [15] W. K. Lane, “Light emitting unit for continuous light production”, U.S., Patent US20130141900A1, Jun. 6, 2013. [En línea]. Disponible en: <https://patentimages.storage.googleapis.com/f6/89/60/242f9861427fb1/US20130141900A1.pdf>
- [16] Supermagnete, “Anillo imán”, Nov, 2019. [En línea]. Disponible en: [https://www.supermagnete.de/eng/ring-magnets-neodymium/ring-magnet-25mm-4.2mm-5mm\\_R-25-04-05-N](https://www.supermagnete.de/eng/ring-magnets-neodymium/ring-magnet-25mm-4.2mm-5mm_R-25-04-05-N)
- [17] Supermagnete, “Disco magnético autoadhesivo” noviembre de 2019. [En línea]. Disponible en: [https://www.supermagnete.de/eng/adhesive-magnets-neodymium/disc-magnet-self-adhesive-25mm-2mm\\_S-25-02-FOAM?group=discs](https://www.supermagnete.de/eng/adhesive-magnets-neodymium/disc-magnet-self-adhesive-25mm-2mm_S-25-02-FOAM?group=discs)
- [18] Supermagnete, “Bloque imán” diciembre de 2019. [En línea]. Disponible en: [https://www.supermagnete.de/eng/block-magnets-neodymium/block-magnet-40mm-20mm-10mm\\_Q-40-20-10-N](https://www.supermagnete.de/eng/block-magnets-neodymium/block-magnet-40mm-20mm-10mm_Q-40-20-10-N)
- [19] Y. U. Lopez Castrillon y F. A. Gaviria Cataño, “Metodología y evaluación de recursos energéticos renovables: implementación de microrredes aisladas”, Vis. Electron., vol. 12, no. 2, pp. 162–172, 2018. <https://doi.org/10.14483/22484728.14260>
- [20] R. M. Molano-Pulido, F. Parca-Acevedo, F. M. Cabrera, H. Ñungo-Londoño, “Prototipo control de vehículo robot por señales EMG”, Vis. Electron., vol. 15, no. 2, pp. 264–271, 2021. <https://doi.org/10.14483/22484728.18948>

