

## Tema 2 – Energía Solar, aplicaciones agrícolas e industriales

### CÁLCULO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA BOMBA DE ACCIONAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO AUTOMÁTICA CON ENERGÍA SOLAR

V. Rodrigo<sup>1</sup>, L. Rodrigo<sup>2</sup>, R. Rodrigo<sup>3</sup>, O. Massini<sup>4</sup>, F. Bergoglio<sup>5</sup>, D. Savarino<sup>6</sup>, C. Medaglia<sup>7</sup>, J. Carletto<sup>8</sup>,  
Laboratorio de Energías Alternativas – Universidad Nacional de San Luis -  
Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias  
Avda. 25 de Mayo 384 - 5730 Villa Mercedes - San Luis - Argentina  
Tel. Central VoIP: 054-2657-531000 Int. 7169 - e-mail: victorrodrido51@gmail.com

**RESUMEN:** El objetivo de la Bomba Electromagnética, es la extracción de 3000 litros de agua diarios, mediante el empleo de energía fotovoltaica; y cuya aplicación concierne al abastecimiento cotidiano de un grupo de 5 personas pertenecientes a un hogar con déficit energético. El estudio de esta bomba, comenzó a desarrollarse en la Facultad de Ingeniería y se destaca sobre todo la innovación en el mecanismo de accionamiento de la bomba, el cual es del tipo electromagnético (mediante la interacción de tres electroimanes) cuya corriente será controlada electrónicamente. La energía necesaria para la excitación de las bobinas proviene de un banco de baterías las cuales se cargan por medio de un panel solar fotovoltaico. De esta manera, se desarrolla un sistema capaz de aprovechar la energía del sol como fuente de recurso renovable. Se destaca a su vez el hecho que el prototipo construido funciona de acuerdo a lo esperado.

**Palabras Claves:** extracción, agua, solar, electromagnética, bomba

#### INTRODUCCIÓN

Se sabe que las bombas de desplazamiento positivo, con accionamiento a diafragma son las más convenientes para la extracción de agua debido a su bajo costo y poco mantenimiento. Es por ello que se construye el prototipo de la bomba electromagnética y como su utilización va a ser planteada en un ambiente donde no existe energía convencional o el costo de instalación de la misma es elevado, se recurre a la utilización de la energía solar fotovoltaica. Sabiendo que la eficiencia en los paneles solares convencionales no supera el 25% y que el costo de cada uno de ellos es muy alto y se incrementa, lógicamente, con el aumento de la potencia, sobresale la intención de trabajar sobre el desarrollo de una bomba a diafragma de bajo consumo energético.

Los siguientes cálculos responden a la adecuación de la planilla de procesamiento de datos, formulada para el cálculo de las características eléctricas-geométricas de los electroimanes propuestos, que requieren una fuerza de atracción determinada de ante mano. En esta no se tienen en cuenta las pérdidas magnéticas en el núcleo por Histéresis y Corrientes Parásitas, pero sí las perdidas por flujo disperso.

#### DESCRIPCIÓN Y CÁLCULO DEL PROTOTIPO

El dispositivo se conforma de tres electroimanes, dos de los cuales se encuentran en los extremos del mismo, y responden a iguales condiciones geométricas y eléctricas; por ende el estudio electromagnético se realiza sobre el electroimán móvil y solamente sobre uno de los ejemplares estáticos.

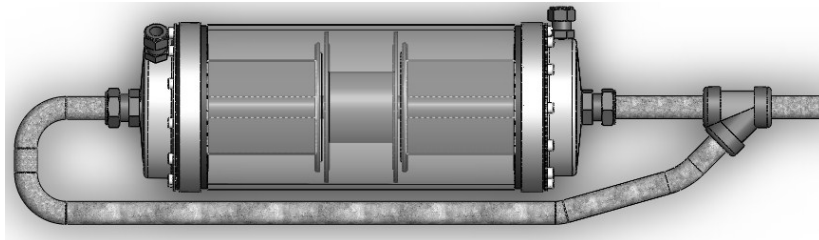


Figura N°1: Esquema de la Bomba Terminada

<sup>1</sup> Investigador CyT UNSL

<sup>3</sup> Investigador CyT UNSL

<sup>3</sup> Investigador CyT UNSL

<sup>4</sup> Investigador CyT UNSL

<sup>5</sup> Investigador CyT UNSL

<sup>6</sup> Alumno Pasante

<sup>7</sup> Alumno Pasante

<sup>8</sup> Investigador CyT UNSL



Figura N°2: Electroimán móvil superior terminado



Figura N°3: Bomba ensamblada

Datos principales para el cálculo

Material del devanado	<b>cobre</b>
Tipo de aislación	Esmalte clase 200 °C
Resistividad del material (ρcu)	0,017 Ωmm <sup>2</sup> / m
Fuerza de Atracción para el cálculo (Ft)	2500 N (254 <b>Kg</b> )
Tensión de Alimentación(V)	24 VCC
Longitud del Entrehierro (e)	6 mm
Tipo de Material	Chapa magnética ordinaria

Tabla N°1: Datos iniciales de cálculo

## CÁLCULO GEOMÉTRICO Y ELÉCTRICO DEL ELECTROIMÁN ESTÁTICO

Configuración del circuito magnético fijo

Diámetro externo cuerpo (De')	<b>152</b>	<b>mm</b>
Espesor tapas (d1')	3	mm
Espesor cuerpo (d2')	3	mm
Longitud Cuerpo (L2')	120	mm
Longitud UTIL axial del núcleo (A')	100	mm
Diámetro Núcleo Magnético Fijo (D')	80	mm

Tabla N°2: Datos geométricos preestablecidos en el electroimán estático

Cálculos auxiliares

- Diámetro exterior del devanado (de')

$$de' = De' - (2 * d2') - 30 = 152 \text{ mm} - (2 * 3 \text{ mm}) - 30 \text{ mm} = 116 \text{ [mm]} \quad (1)$$

- Longitud UTIL transversal del núcleo (Ra')

$$Ra' = (de' - D')/2 = (116 \text{ mm} - 80 \text{ mm})/2 = 18 \text{ [mm]} \quad (2)$$

- Diámetro medio del núcleo (dmn')

$$dmn' = (D^{'} + de^{'})/2 = (80 \text{ mm} + 116 \text{ mm})/2 = 98 \text{ [mm]} \quad (3)$$

a) Determinación de las secciones

- La Sección Real del Núcleo Magnético Fijo ( $S_p'$ ) es  $5024 \text{ mm}^2$ , considerando un diámetro de 80mm.
- Sec. Cuerpo del núcleo ( $S_{cn}'$ )

$$S_{cn}' = \pi * \frac{De'^2 - (De' - 2*d_2')^2}{4} = \pi * \frac{(152 \text{ mm})^2 - (152 \text{ mm} - 2*3 \text{ mm})^2}{4} = 1404 \text{ [mm}^2] \quad (4)$$

- Sec. Tapas ( $S_t'$ )

$$S_t' = \pi * De' * d_1' = \pi * 152 \text{ mm} * 3 \text{ mm} = 1432 \text{ [mm}^2] \quad (5)$$

Para cumplir la relación  $L/e > 5$ , la longitud a utilizar es la correspondiente al menor lado de una sección rectangular. Es por ello que para adecuar los cálculos a la misma se hace una analogía con la sección que tendría un núcleo magnético cuadrado equivalente.

Analogía con núcleo cuadrado

- Lado equivalente ( $L_e'$ )

$$L_e' = \sqrt{S_p} = \sqrt{5672 \text{ mm}^2} = 70,88 \text{ [mm]} \quad (6)$$

- Relación empírica

$$\frac{L_e'}{e} = \frac{70,88 \text{ mm}}{6 \text{ mm}} = 11,81 \quad (7)$$

- La sección Total Equivalente del Entrehierro ( $A_a'$ ) es de  $5911 \text{ mm}^2$ , considerando un diámetro de 86 mm.
- Corrección por dispersión y pérdidas de flujo ( $S_{perd}'$ )

$$S_{perd}' = (L_e' + 2e) * (L_e' + 2e) = (70,88 \text{ mm} + 2 * 6 \text{ mm})^2 = 6869 \text{ [mm}^2] \quad (8)$$

b) Determinación de fuerza magnetomotriz necesaria

- La Inducción magnética en el entrehierro ( $B_a'$ ) es de 0,8 T. Teniendo en cuenta que la fuerza magnética de atracción para el electroimán fijo se establece en un 60% del valor total requerido (2500 N), por ser este de funcionamiento estático y poseer por ende una mayor sección.
- Longitud aproximada del Circuito Fe ( $L_{fe}'$ )

$$L_{fe}' = L_2 * 2 + De = 120 \text{ mm} * 2 + 152 \text{ mm} = 392 \text{ [mm]} \quad (9)$$

- Long. Total del circuito ( $L_t'$ )

$$L_t' = (L_{fe}' + e)/1000 = (392 \text{ mm} + 6 \text{ mm})/1000 = 0,398 \text{ [m]} \quad (10)$$

- El Campo Magnético necesario en el aire ( $H_a'$ ), obtenido a partir de la interpolación de los datos que se presentan en la bibliografía utilizada a partir de la inducción  $B_a'$  previamente calculada, es de 6726 Av/cm.
- Flujo magnético ( $\Phi_a' = \Phi_{fe}'$ )

Suponiendo el flujo magnético sustancialmente constante en el entrehierro ( $\Phi_a = \Phi_{fe}$ )

$$\Phi a' = B a' * S_{perd}' = 0,8 T * \frac{5911 \text{ mm}^2}{\left(\frac{1000 \text{ mm}}{m}\right)^2} = 0,00549 \text{ [Wb]} \quad (11)$$

- La inducción magnética en el hierro ( $B_{fe}'$ ) posee un valor de 1,09 T, para el flujo  $\Phi_a$  y la sección  $S_{p'}$  previamente determinados
- Campo magnético necesario en el Hierro ( $H_{fe}'$ )

A partir de la aproximación obtenida para la inducción magnética en el hierro ( $B_{fe}$ ), es posible conocer la intensidad de campo magnético ( $H_{fe}$ ) a través de los datos bibliográficos consultados.

Por lo tanto, para  $B=1,09$  T y el tipo de material establecido como dato de entrada; se obtiene por interpolación un valor aproximado de intensidad de campo:

$$H_{fe}' = 4,7 \text{ [Av/cm]}$$

- Fuerza Magnetomotriz Necesaria ( $F_{mm}'$ )

$$F_{mm}' = H_{fe}' * \frac{L_{fe}}{10} + H_a * \frac{e}{10} \quad (12)$$

Reemplazando los valores correspondientes, se obtiene una  $F_{mm}'$  igual a 4220 Av

c) Configuración del devanado – Características geométricas y físicas – Características Eléctricas

- La Longitud de la espira media ( $L_m'$ ) es igual a 307,7 mm, para un diámetro de espira de 98 mm
- Sección Admisible del Conductor ( $S_{ac}'$ )

$$S_{ac}' = \rho_{cu} * \left(\frac{L_m'}{1000}\right) * \left(\frac{F_{mm}'}{V}\right) \quad (13)$$

Reemplazando los valores correspondientes se obtiene una Sección Admisible de 0,92 mm<sup>2</sup>, para una Tensión de 24 V. En función de esto, la sección COMERCIAL adoptada es la inmediata superior, la cual posee un valor de 0,95 mm<sup>2</sup>, y un diámetro de alambre  $\Phi_c'$  de 1,10 mm.

- Los datos anteriores permiten inferir los siguientes valores:
  - N° de capas ( $N_c'$ ): 16
  - N° espiras/capa ( $N_e'$ ): 90
  - N° total de espiras (N): 1440 vueltas
  - Longitud total del devanado: 443,1 m
  - Peso del devanado: 3,74 Kg
- La resistencia para la sección comercial y la longitud del devanado adoptados, es de 7,93 [ $\Omega$ ].
- La corriente ( $I'$ ) determinada por ley de Ohm, arroja un valor de 3,02 A

Con los datos de corriente y sección anteriores se determina un valor de densidad de corriente igual a 3,18 A/mm<sup>2</sup>.

d) Determinación de la fuerza magnetomotriz obtenida

La Fuerza Magnetomotriz total ( $F_{mmt}'$ ) engendrada para las 1440 vueltas y la corriente  $I'$  calculada por Ley de Ohm es de 4358 Av.

Por simple inspección visual se puede aseverar de que la fuerza magnetomotriz desarrollada es mayor a la requerida. Lo cual implica que la fuerza de atracción del electroimán es mayor a la preestablecida. Y el electroimán calculado satisface las condiciones magnéticas propuestas.

## CÁLCULO GEOMÉTRICO Y ELÉCTRICO DEL ELECTROIMÁN MÓVIL

El procedimiento de cálculo para el electroimán móvil son análogos a los descritos en el apartado anterior (electroimán fijo), por lo tanto, a continuación solamente se detallan los datos y se enumeran los resultados sin hacer referencia a las ecuaciones anteriores.

### Configuración del circuito magnético móvil

Diámetro externo cuerpo ( $D_e''$ )	124	mm
Espesor tapas ( $d_1''$ )	3	mm
Espesor cuerpo ( $d_2''$ )	3	mm
Longitud Cuerpo ( $L_2''$ )	70	mm
Longitud UTIL axial del núcleo ( $A''$ )	60	mm
Diámetro Núcleo Magnético Fijo ( $D''$ )	65	mm

Tabla N°3: Datos geométricos preestablecidos en el electroimán dinámico

### Cálculos auxiliares

- Diámetro exterior del devanado ( $d_e''$ ): 112 mm
- Longitud UTIL transversal del núcleo ( $R_a''$ ): 23,5 mm
- Diámetro medio del núcleo ( $d_{mn}''$ ): 88,5 mm

### a) Determinación de secciones

- Sec. Real Núcleo Magnético móvil ( $S_p''$ ): 3317 mm<sup>2</sup>
- Sec. Cuerpo del núcleo ( $S_{cn}''$ ): 1140 mm<sup>2</sup>

Para cumplir la relación  $L/e > 5$ , la longitud a utilizar es la correspondiente al menor lado de una sección rectangular. Es por ello que para adecuar los cálculos a la misma se hace una analogía de la sección que tendría un núcleo magnético cuadrado equivalente.

### Analogía con núcleo cuadrado

- Lado equivalente ( $L_e''$ ): 57,59 mm
- Relación empírica: 9,59
- Sección núcleo cuadrado equivalente ( $S_{nce}''$ ): 4043 mm<sup>2</sup>
- Secc. Total Eq. Entrehierro ( $A_a''$ ), considerando un diámetro de 71 mm: 4044 mm<sup>2</sup>
- Corrección por dispersión y pérdidas de flujo ( $S_{perd}''$ ): 4843 mm<sup>2</sup>

### b) Determinación de fuerza magnetomotriz necesaria

- Inducción magnética en el entrehierro ( $B_a''$ ): 0,79 T

La fuerza magnética de atracción para el electroimán móvil se establece en un 40% del valor total requerido (2500 N), por ser este de funcionamiento dinámico y necesitar por ende un menor peso a fin de reducir la fuerza inercia en el movimiento alternativo.

- Longitud aproximada del Circuito Fe ( $L_{fe}''$ ): 244 mm
- Long. Total del circuito ( $L_t''$ ): 0,25 m
- Campo magnético necesario en el Aire ( $H_a''$ ): 6640 Av/cm

La relación que acompaña a esta ecuación se obtiene a partir de la interpolación de los valores dados en la Tabla N°8 (Inducción en el aire), para la intensidad de campo magnético (H en Av/cm) y a partir de la inducción  $B_a''$  previamente calculada.

Suponiendo el flujo magnético sustancialmente constante en el entrehierro ( $\Phi_a = \Phi_{fe}$ )

- Flujo magnético ( $\Phi a'' = \Phi fe''$ ): 0,00382 Wb
- Inducción magnética en el hierro ( $Bfe''$ ): 1,15 T
- Campo magnético necesario en el Hierro ( $Hfe''$ )

A partir de la aproximación obtenida para la inducción magnética en el hierro ( $Bfe$ ), es posible conocer la intensidad de campo magnético ( $Hfe$ ) a través de los datos bibliográficos consultados.

Por lo tanto, para  $B=1,15$  T y el tipo de material establecido como dato de entrada; se obtiene por interpolación un valor aproximado de intensidad de campo:

$$Hfe'' = 6,3 [Av/cm]$$

- Fuerza Magnetomotriz Necesaria ( $Fmm''$ ): 4138 Av

#### c) Configuración del devanado

##### 1. Características geométricas-físicas

- Longitud de la espira media ( $Lm''$ ): 277,8 mm
- Sección Admisible del Conductor ( $Sac''$ ): 0,81 mm<sup>2</sup>

Reemplazando los valores correspondientes se obtiene una Sección Admisible de 0,81 mm<sup>2</sup>, para una Tensión de 24 V. En función de esto, la sección COMERCIAL adoptada es la inmediata superior, la cual posee un valor de 0,95 mm<sup>2</sup>, y un diámetro de alambre  $\Phi c'$  de 1,10 mm.

- Los datos anteriores permiten inferir los siguientes valores:
  - N° de capas ( $Nc'$ ): 21
  - N° espiras/capa ( $Ne'$ ): 54
  - N° total de espiras ( $N$ ): 1130 vueltas
  - Longitud total del devanado: 314 m
  - Peso del devanado: 2,65 Kg

##### 2. Características eléctricas

- Resistencia para la sección adoptada ( $R1''$ ): 5,62 [ $\Omega$ ]
- Corriente por ley de Ohm ( $I''$ ): 4,27 A
- Densidad de corriente ( $J''$ ): 4,49 A/mm<sup>2</sup>

#### d) Determinación de la fuerza magnetomotriz obtenida

- Fuerza Magnetomotriz engendrada total ( $Fmmt''$ ): 4826 Av

Por simple observación puede cerciorarse de que la fuerza magnetomotriz desarrollada es mayor a la requerida. Lo cual implica que la fuerza de atracción del electroimán móvil es mayor a la preestablecida.

### CÁLCULO DE LA FUERZA DE ATRACCIÓN TOTAL (FT)

- Corriente total ( $It$ )

Por ser la tensión de alimentación continua, y el conexionado de las bobinas en paralelo, la corriente total que absorberá el dispositivo responde a la ley de ohm y estará dada por la suma de las corrientes de cada uno de los devanados.

$$It = I' + I'' = 3,02 A + 4,27 A = 7,29 [A] \quad (14)$$

- Flujo magnético total aproximado ( $\Phi t$ )

$$\Phi t = \Phi' + \Phi'' = 0,00457 Wb + 0,00334 Wb = 0,00791 [Wb] \quad (15)$$

- Fuerza magnética de atracción, total ( $F_t$ )

$$F_t = F' + F'' = 1406 \text{ N} + 1101 \text{ N} = 2507 \text{ [N]} \quad (16)$$

### CÁLCULO DE POTENCIA ELÉCTRICA DESARROLLADA

- Potencia total adquirida por el dispositivo ( $P_t$ )

$$P_t = V * I_t = 24 \text{ V} * 7,29 \text{ A} = 175 \text{ [W]} \quad (17)$$

### ESTIMACIÓN DEL RENDIMIENTO GLOBAL

- Potencia útil ( $P_u$ )

La potencia útil es la necesaria para elevar el caudal previsto (0,14 lt/s), al tanque de almacenamiento en altura, provisto a 20 m por sobre la sección de salida de la bomba.

$$P_u = \gamma * Q * H = 1000 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * 0,00014 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 30,33 \text{ m} = \frac{4,3 \frac{\text{Kg m}}{\text{s}}}{75 \frac{\text{Kg m}}{\text{CV}}} * 736 \frac{\text{W}}{\text{CV}} = 42,2 \text{ W} \quad (18)$$

- Potencia absorbida ( $P_a$ )

La potencia absorbida es la potencia de los electroimanes funcionando en paralelo es  $P_a = 175 \text{ W}$

- Rendimiento global ( $\eta_t$ )

$$\eta_t = \frac{P_u}{P_a} = \frac{42,2 \text{ W}}{175 \text{ W}} = 0,241 \text{ ó } 24,1 \% \quad (19)$$

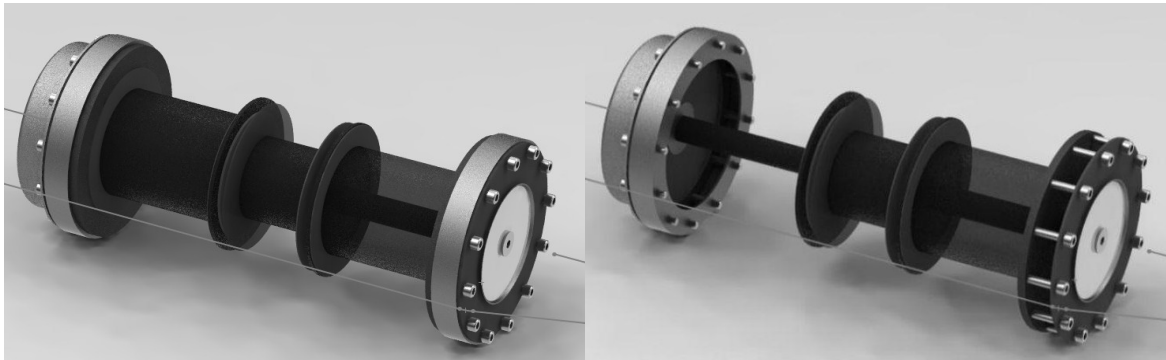


Figura N°4 Bomba Electromagnética 3D - Vista en detalle de Electroimanes

### SISTEMA ENERGETICO - DESCRIPCIÓN Y FUNCIONAMIENTO

En la Figura 5 se presenta el esquema global utilizado para la extracción de agua a profundidad con energías alternativas. La generación de energía eléctrica se obtiene mediante el uso de paneles solares, los cuales se conectan a un acumulador eléctrico a través de un regulador de voltaje. Luego con un convertor de tensión se energiza un controlador de tiempo (PLC) el cual comanda la excitación de los electroimanes.

Para el diseño del sistema fotovoltaico se utilizaron los datos obtenidos de los recursos solares para esta región del país (V. Mercedes - San Luis), los que fueron determinados mediante un pyranómetro además de correlaciones matemáticas y la base de datos de radiación global disponibles para la zona.

Se está trabajando en la actualidad en la utilización de energía eólica, donde se reemplazan los paneles solares por aerogeneradores, de esta forma, se podrá evaluar la energía alternativa adecuada para cada zona. Además se efectuó una

comparación técnica-económica con otros tipos de energías y sistemas tradicionales de extracción de agua y de energía eléctrica, de manera de ofrecer a potenciales usuarios, una herramienta que les ayude a tomar decisiones sobre la conveniencia o no de un sistema adoptado para el abastecimiento de agua.

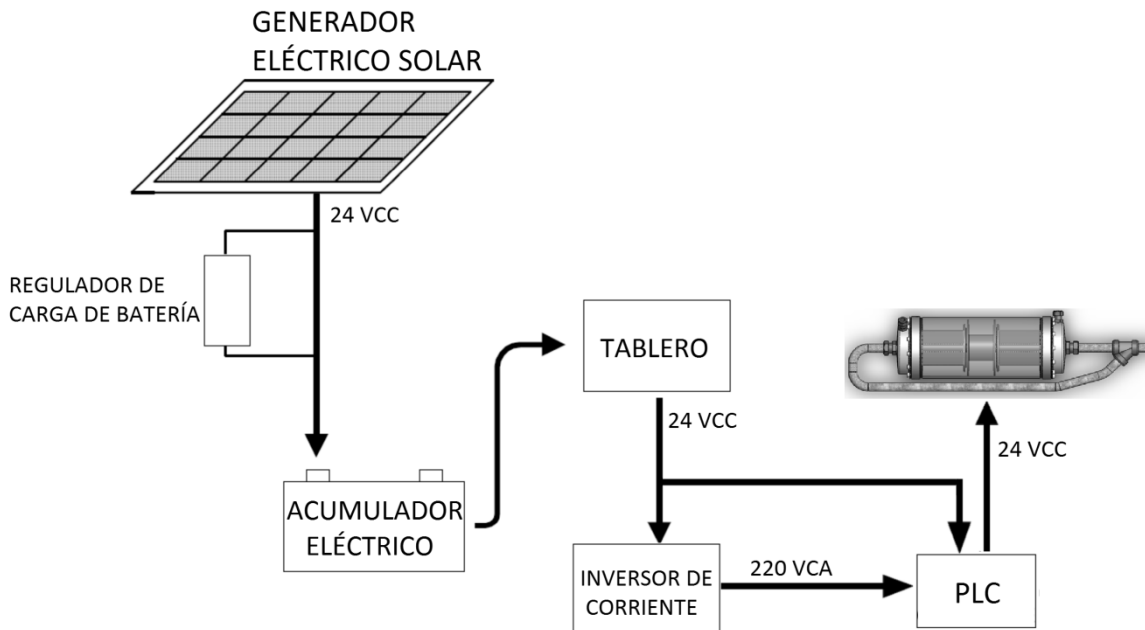


Figura N°5: Esquema de funcionamiento de la Bomba Electromagnética

## CONCLUSIONES

Como principal conclusión se establece el hecho que el prototipo armado funciona según las condiciones requeridas, el cual responde de manera eficiente a las diferentes situaciones planteadas y que la utilización de una de las energías alternativas satisface los requerimientos de potencia que este dispositivo solicita para su correcto funcionamiento.

Cabe destacar que el análisis emprendido a lo largo de este trabajo fue realizado bajo las condiciones más desfavorables. Dicho sobredimensionamiento se realiza a fin de crear un diseño eficiente, y con ello hacer frente a incertidumbres, errores o circunstancias no contempladas en el presente proyecto.

Por otro lado, a pesar de que el dispositivo funciona correctamente, éste nos lleva a realizar futuras experiencias a fin de lograr maximizar los recursos empleados y hacer más eficiente el uso de las energías, dejando a posteriori, el análisis detallado de como es el aprovechamiento de las mismas.

## REFERENCIAS

E.E Staff de M.I.T (1984). Circuitos Magnéticos y Transformadores. Editorial Reverté.  
 Jesús Fraile Mora. Maquinas Eléctricas. 5ta Edición. Editorial Mc Graw Hill

## ABSTRACT

The aim of the Electromagnetic Bomb, is to extract 3,000 liters of water daily, through the use of photovoltaics; and whose application concerning the daily supply of a group of 5 persons belonging to a household with energy deficit. The study of this pump, began to develop in the College of Engineering and featuring top innovation in the drive mechanism of the pump, which is the electromagnetic type (through the interaction of three electromagnets) whose current will be electronically controlled. The energy required for the excitation of the coils comes from a bank of batteries which are charged by a solar panel. In this way a system capable of harnessing energy from the sun as a renewable resource is developed. It stands to turn the fact that the constructed prototype works as expected.

**Keywords:** energy measurement, solar and wind energy, data acquisition