

Captación del campo magnético de líneas eléctricas para uso doméstico en zonas rurales de Panamá

Harnessing of the magnetic field of power lines for domestic use in rural areas of Panama

Alan R. Morales C.^{1*}, Alexander Vinda¹, José A. Araúz D.¹, Adán A. Atencio A.¹, Omar Aizpurúa²

¹Licenciatura en Ingeniería Electromecánica, Centro Regional de Chiriquí, Universidad Tecnológica de Panamá, ²Facultad de Ingeniería Eléctrica, Centro Regional de Chiriquí, Universidad Tecnológica de Panamá

Resumen En la actualidad, en los países en vías de desarrollo, hay comunidades de bajos recursos económicos, con difíciles o inexistentes vías de comunicación terrestre y que no poseen fluido eléctrico convencional. El objetivo del estudio fue desarrollar un prototipo, con un método eficiente y sostenible, para generar energía eléctrica, cuya fuente de origen sean las líneas de transmisión y distribución que atraviesan las zonas rurales. La innovación metodológica fue no convencional, sin contacto físico, con bajos riesgos y costos, aumentando la cobertura eléctrica en estas regiones, y con ello la calidad de vida de sus habitantes. El diseño integral del prototipo experimental permitió realizar las variaciones programáticas de la corriente (I), con un diseño eficiente del elevador para evaluar diferentes alturas (h) del conductor-fuente (simulando una línea eléctrica real), con la bobina receptora (dispositivo de captura del campo magnético). Los análisis de los datos registrados reflejaron que, al utilizar el regresor $1/h$, se detectó la respuesta significativa en V, resultante por la ecuación $V = 5.5143(1/h) + 0.26944$, con $R^2 = 0.993$ ($p < 0.01$). Al detectarse residuos dispersos y faltas de ajustes al modelo lineal, se aplicó la regresión cuadrática con los predictores $1/h$ y $1/h^2$, con $R^2 = 0.999$ ($p < 0.01$), que permitieron estimar la generación de V en el prototipo. Se obtuvieron voltajes entre 1 a 10 voltios de corriente alterna (AC). Se logró el encendido de bombillos tipo leds y cargas de baja potencia eléctrica.

Palabras clave Acoplamiento magnético, cosecha de energía, inducción electromagnética, Tesla.

Abstract The objective of the study was to develop a prototype, with an efficient and sustainable method, to generate electricity, whose source of origin is the transmission and distribution lines that cross rural areas. At present, in developing countries, there are communities of low economic resources, with difficult or non-existent terrestrial communication routes and that do not have conventional electric fluid. The methodological innovation was unconventional, without physical contact, with low risks and costs, increasing the electrical coverage in these regions, and with it the quality of life of its inhabitants. The integral design of the experimental prototype allowed to perform the programmatic variations of the current (I), with an efficient design of the elevator to evaluate different heights (h) of the driver-source (simulating a real power line), with the receiving coil (device of magnetic field capture). The analysis of the recorded data reflected that using the regressor $1/h$, the significant response in V was detected, resulting from the equation. $V = 5.5143(1/h) + 0.26944$, with $R^2 = 0.993$ ($p < 0.01$). When detecting scattered residuals and lack of adjustments to the linear model, the quadratic regression was applied with the predictors $1/h$ and $1/h^2$, with $R^2 = 0.999$ ($p < 0.01$) that allowed to estimate the generation of V in the prototype. Voltages between 1 to 10 volts of alternating current (AC) were obtained the lighting of LED-type bulbs and low electric power loads was achieved.

Keywords Electromagnetic induction, energy harvesting, magnetic coupling, Tesla.

* Corresponding author: alanmcol10@gmail.com

1. Introducción

En los países en vías de desarrollo, se evidencia la escasez o falta total de energía eléctrica en algunas regiones. Algunos países en la región africana tienen coberturas menores al 10% [1]. En la República de Panamá, en pleno siglo XXI, a pesar de que existen líneas de transmisión y distribución eléctrica que

atraviesan todo el territorio nacional, hay poblados por diversas provincias; sin embargo, no hay acceso al fluido eléctrico. Ello, es atribuible, en gran parte, a las características de las propias zonas de vida predominantes (p.e. abundancia de zonas boscosas), condiciones climatológicas, topográficas y por faltas de vías de transporte terrestre que comuniquen a los

poblados alejados con los centros urbanos [2]. La falta de fluido eléctrico se constituye en una barrera natural, económica y social, hacia el desarrollo sostenible de los habitantes de las comunidades afectadas. El gobierno panameño se ha comprometido con el cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS), lo que se traduce en la adopción de medidas para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y garantizar que todas las personas gocen de paz y prosperidad [3]. Específicamente para el cumplimiento efectivo del Objetivo 7 (energía asequible y no contaminante), se requiere del conocimiento de los procesos de inducción, los campos magnéticos, almacenamiento de energía, entre otros componentes integrados a la dotación de energía eléctrica en forma permanente. El descubrimiento de la bobina de Tesla de alto voltaje [4], creó las bases conceptuales de la dotación de energía eléctrica sin contacto físico (figura 1). El modelo desarrollado, consistió en un acoplamiento entre dos bobinas con núcleo de aire que, al energizar la bobina primaria, debe entrar en resonancia con la secundaria y con ello, se logró crear una diferencia de potencial [5]. Por su parte, Villalba [6], señaló que la magnitud del campo magnético generado fue dependiente del voltaje aplicado y los parámetros geométricos, como el número de espiras y la longitud. Además, el principio fundamental del funcionamiento de los transformadores es la inducción magnética, la cual fue descubierta por Michael Faraday. Reportó que un campo magnético variable produce un campo eléctrico, y que es posible lo contrario, que el campo eléctrico es producido al pasar un medio móvil por un campo magnético estático [7].



Figura 1. La bobina de Tesla de alto voltaje.
Fuente: Johnson [20]

En la actualidad, con el fin de obtener un sistema con la capacidad de captar energía eléctrica sin contacto directo a la línea principal del suministro, se han desarrollado varios mecanismos de almacenamiento de energía de las líneas de transmisión, tales como: 1) la radiofrecuencia, que utiliza una antena conectada a un rectificador y convierte la fuerza de radiación de la radiofrecuencia en energía de corriente directa

utilizable. Pero la potencia suministrada mediante este método es muy baja [8]. 2) El campo eléctrico que se forma cuando a un conductor se le aplica cierto voltaje, el excedente de energía es dirigido hacia la superficie de dicho conductor [9]. Para darle uso a esta energía, se conecta un convertidor al capacitor para proporcionar energía en corriente continua. En las figuras 2 y 3, se presenta el mecanismo donde se aplicó a sistemas de monitoreo de la línea. 3) El campo magnético, donde se coloca una bobina directamente en las líneas de transmisión para almacenar la energía producida por el campo [10], (ver figura 4). Este método posee riesgos físicos para operarios y en la instalación de equipos en líneas de alto voltaje. Además, que requiere de bobinas de gran tamaño que conllevan el hundimiento de la línea. Para evitar estas limitaciones técnicas y de seguridad operacional, se propuso el diseño de una bobina que se colocó a una corta distancia sobre la tierra que evade los problemas de tamaño y redujo el riesgo de instalación (figura 5). 4) La inducción para alimentar electrodomésticos de potencia media, o centenares de Watts. Se logró la conexión inalámbrica. Utiliza la topología de tanque resonante serie-serie expuesta en la figura 6, ya que la frecuencia resonancia no fue influenciada por factores como la distancia entre los devanados o la carga. Sin embargo, el núcleo de aire que existe entre las dos bobinas provocó pérdidas significativas de energía.

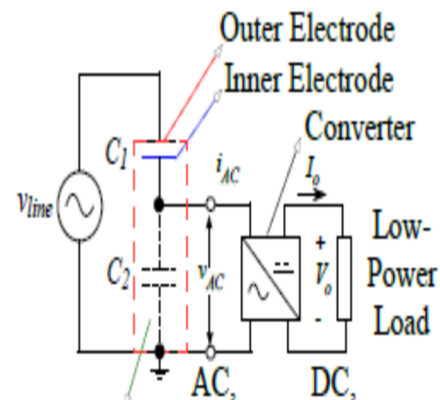


Figura 2. Diagrama de conexión eléctrica en un circuito pequeño.
Fuente: Guerra [7].

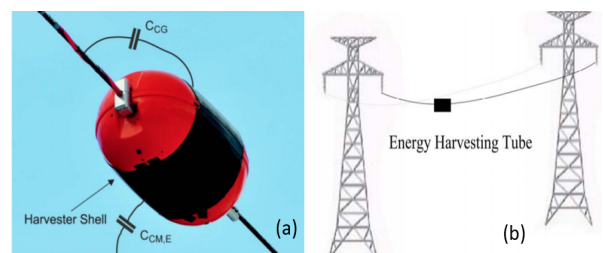


Figura 3. Mecanismo del campo magnético, con una bobina colocada en las líneas de transmisión para almacenar la energía producida
Fuente: Moser, et al., [11] y Guo, et al., [12]

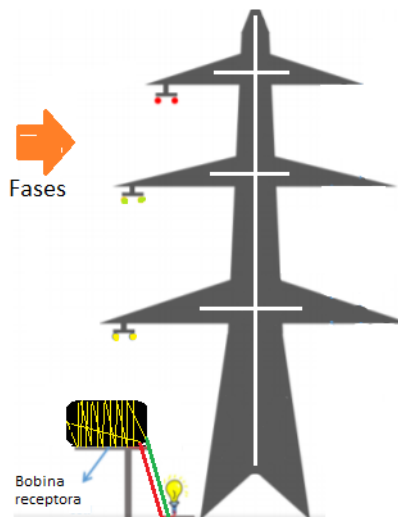


Figura 4. Diseño de una bobina captadora de energía que emana de líneas de transmisión de alto voltaje, con mínimo riesgo para la instalación y operacional.

Fuente: Elaboración propia

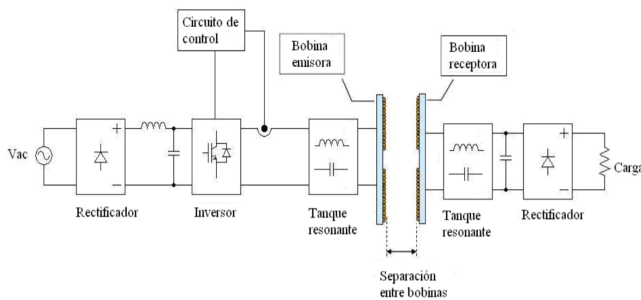


Figura 5. Mecanismo de inducción para alimentar electrodomésticos de potencia media, con conexiones eléctricas inalámbricas.

Fuente: Transmisión de energía eléctrica por inducción para uso doméstico. Vila [9]

González y Alonso [10], reportaron sobre las limitaciones de las descargas máximas de una fuente de alto voltaje de la bobina Tesla, por la distancia de tensión de la bobina que utilizó un filamento creado por pulsos laser. Por otro lado, con los registros obtenidos por diversos mecanismos de obtención de energía, los respectivos consumos de energía han sido modelados e interpretados con los análisis de regresión [13]. El estudio desarrollado se planteó el supuesto que la altura de la bobina del prototipo de captación de línea de transmisión de alto voltaje y la corriente permiten estimar el voltaje obtenido en el prototipo para distribuir a las comunidades que no poseen el fluido eléctrico permanente. Por todo lo expuesto, el objetivo de este estudio fue desarrollar un prototipo con un método eficiente y sustentable de generar energía eléctrica, cuya fuente de origen sean las líneas de transmisión existentes en las zonas rurales de Panamá, para las comunidades de bajos recursos económicos y con difíciles o inexistentes vías de comunicación terrestre.

2. Materiales y Métodos

2.1 Ubicación geográfica

El estudio se implementó en la provincia del Darién, ubicada al Este del país (zona límite con Colombia). Posee una extensión de 11, 896.5 km² (la más extensa de Panamá), cuya capital es la ciudad de La Palma. En su territorio, existen líneas de transmisión de alta tensión, las cuales se utilizarán como fuente para energizar las comunidades seleccionadas para el estudio.

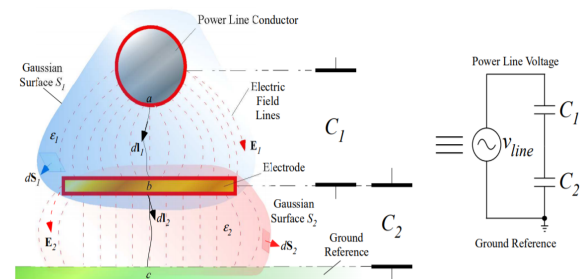


Figura 6: Esquema propuesto de modelo de campo eléctrico para captar el excedente de energía eléctrica.

Fuente: Electric Field Energy Harvesting from Medium Voltage power lines- Juan Carlos Rodriguez Guerra.[7]

2.2 Descripción del prototipo

Para la construcción del prototipo se utilizaron los siguientes materiales (ver Tabla 1):

Tabla 1: Materiales utilizados para la confección del prototipo de captación del campo magnético de líneas eléctricas

Material	Tipo (característica)	Cantidad
Transformador	Monofásico	1
Cable de Aluminio	Calibre #6	8 pies
Bobina	F400A9Y00AP	1
Tubo PVC	¾ plg de dm	3 metro
Tubo "T" de PVC	¾ plg de dm	6
Tubo "T" de PVC	½ plg de dm	1
Tubo PVC	½ plg de dm	0.61 metro
Interruptor	Dimmer	1
Hilo	Nailon	0.61 metro
Disyuntor	Riel	1
Programa estadístico	R versión 4.0.3	1

Para la selección de los materiales utilizados se consultó con la literatura especializada; así como las posibles fuentes de corriente que se podrían utilizar para realizar el estudio y sobre el uso del transformador, ya que este es un complemento importante para poder variar la corriente en el prototipo. Para

obtener un incremento de corriente, fue necesario reemplazar el arroyamiento secundario del transformador de microondas con el cable awg # 6, y colocar la protección al sistema con la ayuda de un disyuntor de 10(A), que constó de un interruptor de seguridad y un potenciómetro para regular la corriente que entra al circuito primario del transformador (ver figura 7).

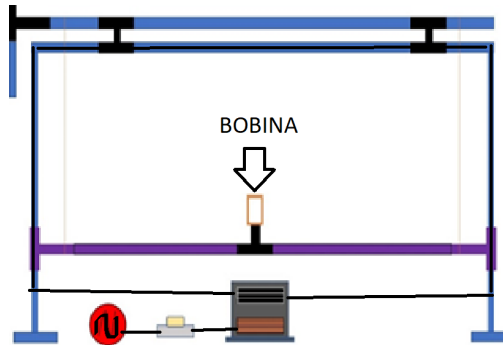


Figura 7: Diseño estructural y funcional del prototipo de captación de energía, cuya fuente es la línea de transmisión de alto voltaje.

2.3 Funcionamiento del prototipo

Como fuente de corriente se utilizó un enchufe para entradas 120V, al cual se conectó una terminal del regulador de intensidad con un transformador y la segunda terminal conformada por una terminal del devanado primario del transformador y otra al cable de retorno del enchufe. En el transformador se eliminó el devanado secundario original y se fabricó uno con tres vueltas y conectando directamente sus terminales para obtener una baja resistencia. Para la construcción de la estructura de soporte, que funcionó como guía para el elevador, del soporte fijo para el conductor y para el eje giratorio del elevador; se utilizaron siete tramos de tubos de PVC de ¾ plg, dos de 0.77 m, uno de 0.5 m y cuatro de 0.25 m cada uno. Para formar los dos postes base se unieron dos tramos 0.25 m a una "T" de ¾ plg en dos de sus extremos y en un tercer orificio perpendicular se insertó el tramo de 0.77 m. En la parte superior de estos postes se conectó un codo PVC de ¾ plg y éstos se unieron al tramo de 0.5 m. Para el diseño y construcción de elevador se cortó un tramo de 0.65 m y otro de 0.25 m de tubo PVC de ½ plg, los cuales se unieron a una T de ½ plg. Se formó un eje de manivela desde la base de la bobina, mediante la unión de las 2 "T" de PVC de 1 plg a los extremos del tramo de 0.5 m, para colocarlo dentro de los postes de la estructura de soporte. Se hicieron dos juegos de la unión entre sí de 2 "T" de ¾ plg para colocarlas en la parte superior de la estructura de soporte e insertar el eje de manivela en estos juegos de 2 "T". Por último, se unió la base de la bobina con dos hilos de nailon atados cerca de los extremos de las "T" de la base donde se ubicó la bobina, hasta del eje de manivela.

El modelo de campo eléctrico propuesto está basado en un acoplamiento de la línea de transmisión y un electrodo, y éste

último conectado en serie a un capacitor, de manera que la energía en exceso no se dirija a tierra y se pueda almacenar (Figura 8).

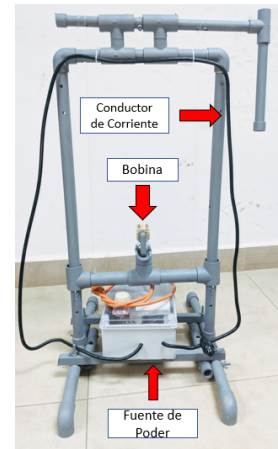


Figura 8: Prototipo realizado para realizar el experimento.

2.4 Diseño metodológico de investigación y análisis estadísticos

Para estimar el voltaje (V) generado por la bobina, se evaluaron las siguientes 10 alturas (h) en cm del transformador: 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18 y 20; y las siguientes 10 corrientes en amperios (I): 80, 85, 90, 95, 100, 105, 110, 115, 120 y 125. Para evaluar el comportamiento del V (variable dependiente) por efecto de las dos variables independientes (altura y corriente), se mantuvo fija la altura y se cambió la corriente. Sin embargo, para analizar las respuestas de V, se formularon modelos simples y completos de su relación en función de I, las variables h y 1/h (fracción unitaria). Para ello, se realizaron los siguientes análisis estadísticos [14].

2.4.1 Modelo lineal general simple

Se realizó la prueba de normalidad, y luego los análisis de dispersión de V inducido con relación a 1/h y análisis de correlación (coeficiente de Pearson). Con el prototipo se realizaron 170 lecturas. El modelo de la regresión lineal fue el siguiente (1):

$$Y = \beta(1/x) + \alpha \quad (1)$$

Donde;

- Y= es un valor representativo de una de las lecturas de Y.
- β = coeficiente parcial de regresión
- α = intercepto
- 1/x= fracción unitaria típico de la variable independiente

En este estudio se fijó la variable h, y para el análisis se utilizó un valor medio de V para cada valor de h. El algoritmo

utilizado del programa estadístico R fue: modelo <- lm(V ~ I(1/h), datos) [15]. A su vez, se realizó el modelo de predicción para estimar las futuras observaciones, con una determinada probabilidad, según lo observado. Para determinar la necesidad de ajustes al modelo lineal, en este análisis se incorporó tanto el error de la estimación y el error irreducible ϵ .

Al encontrar evidencias de efectos cuadráticos en los datos registrados por efecto de la predicción y la falta de ajustes al modelo lineal, se procedió a agregar un término cuadrático. La ecuación de regresión cuadrática se asoció a cada predictor [(1/h) y (1/h²)], los coeficientes $\beta_{1,2}$ que cuantificarán la asociación entre el predictor y la variable respuesta Y (2). El algoritmo utilizado en R fue: modelo <- lm(formula = V ~ I(1/h) + I(1/h^2), datos) [16]. Así, El modelo de la regresión cuadrática múltiple fue la siguiente:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 (1/x) + \beta_2 (1/x^2) \quad (2)$$

Donde;

Y= es un valor representativo de una de las lecturas de Y.

β_0 = intercepto

$\beta_{1,2}$ = son coeficientes parciales de regresión

1/x y 1/x² = fracción unitaria típico de las variables independiente

2.3.5 Análisis de modelos propuestos

Para la prueba de hipótesis nula planteada se realizó el análisis de varianza (ANOVA), mediante el cálculo del estadístico F(*Ftest*), cuyo valor p, se obtuvo a partir de una distribución F. Además, se obtuvo una estimación del intervalo de confianza de β_j , por medio de la ecuación (3).

$$\beta_1 \pm t_{1-\frac{\alpha}{2}} SE_{b1} \quad (3)$$

Donde; estimador de β_i es b_i ; $t_{1-\alpha/2}$, n-3 es el factor de confiabilidad, $\alpha= 0.05$ (valor de τ); SE_{b1} es el error estándar de la estimación.

La idoneidad del modelo se estableció al construir intervalos de confianza de los coeficientes de regresión $\beta_{1,2}$, con el supuesto que los errores ϵ_i están distribuidos normal e independientemente, con media cero y varianza σ^2 . También se analizaron los diagramas de los residuos comparados con los valores predichos y así realizar ajustes a los modelos de predicción.

3. Resultados y discusión

3.1 Funcionamiento operativo del prototipo

El diseño integral del prototipo experimental permitió poner en práctica el funcionamiento eficiente de captación energética (V). Al integrar al circuito primario un interruptor

de corriente en forma de chispa, se indujo un cambio rápido en la corriente, cuya fuente fue un enchufe diseñado para entradas de 120V, con los reguladores de intensidad en serie con un transformador (Figura 8). Permitted realizar las variaciones programáticas de la corriente para que llegara al transformador y que pasara por el devanado secundario del transformador. Esto es, ya que cuando el regulador varió la potencia del devanado primario, también modificó la potencia del secundario.

Un componente clave contemplado fue el diseño eficiente del elevador, cuyo mecanismo creado permitió aumentar y disminuir la distancia entre el conductor de corriente y la bobina. Esto fue posible, ya que en la parte superior de la estructura de soporte se encuentra un eje con una manivela que al girar enrolla dos hilos que están unidos a la base donde se encuentra la bobina. Todos los componentes se complementaron con la estructura de soporte, la cual funcionó como guía para el elevador, como soporte fijo para el conductor y para el eje giratorio del elevador. Es importante señalar que se redujeron al mínimo los riesgos a los operarios potenciales de este prototipo. En la Tabla 2, se muestran los voltajes obtenidos al variar la altura y la corriente.

Tabla 2: Registros de voltajes (V) a diversas alturas (h) y corriente (I)

h(cm)	V(V)	I(A)	h(cm)	V(V)	I(A)	h(cm)	V(V)	I(A)	h(cm)	V(V)	I(A)	h(cm)	V(V)	I(A)	h(cm)	V(V)	I(A)
2	2,8	80	2	3,1	95	2	2,9	110	2	3,1	125	8	0,9	80	16	0,6	80
4	1,8	80	4	1,8	95	4	1,9	110	4	2	125	8	1	85	16	0,6	85
6	1,3	80	6	1,4	95	6	1,4	110	6	1,3	125	8	1	90	16	0,6	90
8	1	80	8	1,1	95	8	1,1	110	8	1	125	8	1	95	16	0,6	95
10	0,8	80	10	0,9	95	10	0,8	110	10	0,8	125	8	1	100	16	0,7	100
12	0,7	80	12	0,7	95	12	0,7	110	12	0,7	125	8	1	105	16	0,7	105
14	0,6	80	14	0,7	95	14	0,6	110	14	0,6	125	8	1	110	16	0,7	110
16	0,6	80	16	0,6	95	16	0,5	110	16	0,5	125	8	1	115	16	0,6	115
18	0,5	80	18	0,6	95	18	0,4	110	18	0,5	125	8	0,9	120	16	0,6	120
20	0,5	80	20	0,5	95	20	0,4	110	20	0,4	125	8	0,8	125	16	0,6	125
2	2,9	85	2	2,9	100	2	2,9	115	4	1,5	80	12	0,7	80	20	0,5	80
4	2,1	85	4	1,8	100	4	1,6	115	4	1,7	85	12	0,7	85	20	0,5	85
6	1,5	85	6	1,3	100	6	1,1	115	4	1,8	90	12	0,7	90	20	0,5	90
8	1,2	85	8	1	100	8	0,8	115	4	1,8	95	12	0,7	95	20	0,6	95
10	0,9	85	10	0,9	100	10	0,6	115	4	1,8	100	12	0,7	100	20	0,6	100
12	0,8	85	12	0,8	100	12	0,5	115	4	1,7	105	12	0,7	105	20	0,6	105
14	0,7	85	14	0,6	100	14	0,7	115	4	1,6	110	12	0,7	110	20	0,6	110
16	0,6	85	16	0,6	100	16	0,6	115	4	1,5	115	12	0,7	115	20	0,5	115
18	0,5	85	18	0,5	100	18	0,5	115	4	1,3	120	12	0,7	120	20	0,5	120
20	0,5	85	20	0,5	100	20	0,5	115	4	1,3	125	12	0,7	125	20	0,5	125
2	3	90	2	3	105	2	3	120	6	1,2	80	14	0,7	80			
4	1,8	90	4	1,9	105	4	1,9	120	6	1,3	85	14	0,7	85			
6	1,3	90	6	1,4	105	6	1,4	120	6	1,3	90	14	0,7	90			
8	1	90	8	1,1	105	8	1,1	120	6	1,3	95	14	0,7	95			
10	0,9	90	10	0,9	105	10	0,9	120	6	1,3	100	14	0,7	100			
12	0,7	90	12	0,7	105	12	0,7	120	6	1,3	105	14	0,7	105			
14	0,6	90	14	0,6	105	14	0,6	120	6	1,3	110	14	0,7	110			
16	0,6	90	16	0,6	105	16	0,5	120	6	1,2	115	14	0,7	115			
18	0,5	90	18	0,5	105	18	0,5	120	6	1,1	120	14	0,6	120			
20	0,5	90	20	0,4	105	20	0,4	120	6	1	125	14	0,6	125			

3.2 Modelamiento de las respuestas de V en función de la 1/h

Se trazó un diagrama de dispersión para analizar el comportamiento de V con relación a 1/h (Figura 9). Al incrementarse la fracción unitaria de h, se incrementó estadísticamente el V ($r = 0.98$ y $p < 0.01$). La gráfica reflejó la

función inversa de los valores originales de h y la simetría entre sí, lo que otorga validez a los resultados de los análisis estadísticos [17]. Se detectó la importancia de esta variable en la predicción de la generación de V .

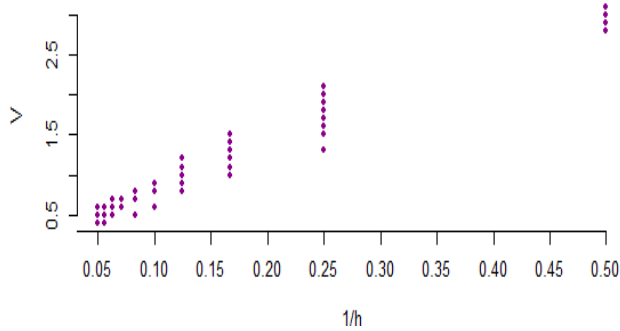


Figura 9. Diagrama de dispersión de la respuesta del V , en función de $1/h$, obtenido de 170 registros. Panamá, 2019.

Para elaborar el mejor modelo de V en función de $1/h$, se fijó la variable independiente h y la I fue aleatoria. Para cada valor fijo de h se obtuvo muchos valores de V , por lo que se recurrió a estimar un valor medio de V para cada valor de h . A estos valores registrados y estimados, se les realizó la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk [18], reflejando una distribución normal y no se requiere ajustes al modelo. La ecuación de la regresión lineal modelo lineal resultante utilizando la ecuación 1, se presenta en la siguiente ecuación (ver ecuación 4):

$$V = 5.5143(1/h) + 0.26944 \quad (4)$$

El ANOVA de la regresión confirmó la importancia de la altura de la bobina del prototipo a la fuente de energía de alto voltaje ($R^2=0.993$), cuyo coeficiente parcial de regresión contribuyó estadísticamente ($p<0.01$), en la predicción de la V . Al verificarse la necesidad de realizar el análisis de los residuos dispersos y valores ajustados (total de ocho), se constató la distribución de normalidad de datos (prueba de Shapiro-Wilk). Por consiguiente, corregido la falta de ajustes al modelo lineal, se obtuvo la ecuación de regresión cuadrática. Representó una extensión de la regresión lineal simple, considerando más de un predictor a la vez [19]. El modelo de la regresión cuadrática lineal, resultante de la ecuación 2, se muestra en la siguiente ecuación, (Ver ecuación 5):

$$V = 0.13975 + 7.25859(1/h) - 3.24588(1/h^2) \quad (5)$$

En la ecuación 5, se evidencia la importancia de las dos variables: $1/h$ y $1/h^2$ ($p<0.01$), para predecir la capacidad generadora de V . La variación explicada por el modelo completo fue de $R^2=0.999$. Con relación al modelo de

predicción, se elaboró la figura 10, que presentó el ajuste del modelo de regresión múltiple cuadrática entre los valores de V y $1/h$, registrados y estimados por lectura en el prototipo experimental. Es importante considerar que los registros de lecturas deben ser precisos, con el mínimo de error en la toma de datos y la debida calibración del prototipo.

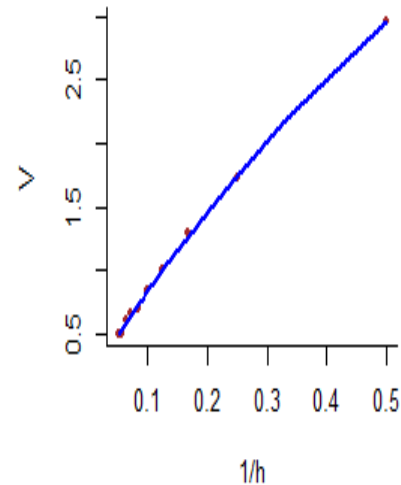


Figura 10: Modelo de predicción de regresión cuadrática lineal entre V y $1/h$, registrados y estimados por lecturas en el prototipo. 2019.

3.3 Análisis de modelos de regresión resultantes

En los modelos de regresión lineal y cuadrática, se comprobó la normalidad de los datos registrados en el estudio; por consiguiente, se procedió a aplicar la ecuación 3, definiendo un intervalo de confianza para la regresión lineal de:

$$\beta_1 \in 5.51431 \pm 2.31 * 0.15071$$

Es decir, el intervalo de confianza de 95% ($gl=8$), para β_1 es;

$$5.1662 \leq \beta_1 \leq 5.8624$$

En cuanto a la regresión cuadrática lineal, el intervalo de confianza resultante de 95% ($gl=7$), para β_1 y β_2 fue:

$$\beta_1 \in 7.25859 \pm 2.36 * 0.23342$$

$$\text{Es decir: } 6.7077 \leq \beta_1 \leq 7.8095$$

$$\beta_2 \in -3.24588 \pm 2.36 * 0.42321$$

$$\text{Es decir: } -4.2446 \leq \beta_2 \leq -2.2471$$

Estos intervalos de confianza permitieron evaluar el rango de valores donde están ubicados los valores reales de los

regresores por ecuación de regresión múltiple. Es decir, permitieron realizar una mejor interpretación y aplicación de los resultados obtenidos.

4. Conclusiones

El funcionamiento del prototipo experimental podría contribuir significativamente al cumplimiento del objetivo 7 de los ODS, de proporcionar energía asequible y no contaminante, de forma continua o permanente a los habitantes de la provincia de Darién y aplicable a todas las zonas rurales de Panamá. Su diseño permitió el registro de lecturas precisos y con el mínimo de error. El análisis estadístico de los datos obtenidos reflejó que la variable independiente h presenta una variación significativa en el voltaje inducido ($p < 0.01$), por lo que supone que el voltaje inducido depende de las distancias. Al analizar la respuesta de generación de V en función de $1/h$, se determinó la relación incremental positiva ($r = 0.98$ y $p < 0.01$). Con el modelo de regresión lineal resultante, se detectó la importancia estadística de la variable h ($p < 0.01$), en la predicción de la captación del campo magnético y la respectiva conversión en V ($R^2 = 0.993$). Se aplicó el modelo de regresión cuadrático lineal, ya que se detectó desviaciones sistemáticas, residuos dispersos y faltas de ajustes al modelo lineal. Así, se determinó la importancia estadística de los regresores $1/h$ y $1/h^2$ ($p < 0.01$), para predecir la capacidad generadora de V por el prototipo ($R^2 = 0.999$).

Se sugiere validar el funcionamiento del prototipo a mayor escala y tamaño, estimando su potencial captador de energía (V), e implementando -con los ajustes dinámicos y armónicos de la I y la h - los modelos de regresión simple y cuadrático que mejor se ajusten en la función de predicción de la futura generación de V .

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto es el resultado de la dedicación y esfuerzo de todo el equipo de trabajo, por eso, agradezco a Erick Guerra, Jahany Hernández, Idaliana Martínez y Jimmy Villamonte por aportar su tiempo y aplicar los conocimientos que juntos aprendimos a lo largo del desarrollo de esta tarea.

A Rodrigo Morales, Ph.D. por su disposición, apoyo y guía en la interpretación de los datos obtenidos que fueron de gran importancia para completar exitosamente este proyecto.

REFERENCIAS

- [1] Banco Mundial, “Cobertura eléctrica por país”, Grupo Banco Mundial, 2020. [En línea]. Disponible: <https://datos.bancomundial.org/indicador/EG.ELC.ACCS.ZS> . [Último acceso: 1 Noviembre 2020]
- [2] J. P. Pinzón González y J. D. Quevedo Orjuela, “Análisis de impactos ambientales provocados por el aprovechamiento de recursos naturales renovables, reconociendo metodologías que desarrollan nuevas fuentes generadoras de energía en Panamá y Colombia”, Trabajo de Grado, Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería de Civil, Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia, 2018.
- [3] E. A. Sánchez-Galán, “El crecimiento económico y la desigualdad en Panamá: una aproximación urbano-rural”, *Visión Antataura*, vol. 3, n° 2, pp. 68-82, 2019.. [En línea]. Disponible: <https://www.revistas.up.ac.pa/index.php/antataura/article/view/1058>
- [4] P. D. Abd Aziz, A. L. Abd Razak, M. I. A. Bakar y N. A. Aziz, “A Study on wireless power transfer using tesla coil technique”, de *2016 International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application (ICSEEA)*, Jakarta, Indonesia, 2016. doi: 10.1109/ICSEEA.2016.7873564
- [5] G. L. Johnson, “Building the world’s largest Tesla coil-history and theory”, *Proceedings of the Twenty-Second Annual North American Power Symposium*, Auburn, AL, USA, 1990, doi: 10.1109/NAPS.1990.151364
- [6] J. M. Villalba, L. Ferreira, E. Arribas, A. Nájera y A. Beléndez, “Estudio experimental de la inducción electromagnética entre dos bobinas: Dependencia con la corriente eléctrica”, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 37, n° 1, p. 1313, 2015. doi: 10.1590/S1806-1117371169
- [7] J. C. Rodríguez Guerra, “Electric Field Energy Harvesting from Medium Voltage Power Lines”, Tesis doctoral. RMIT University Australia, Melbourne, Australia, 2017. [En línea]. Disponible:
- [8] A. Kumar. R., HR. Gayathri., RB. Gowda y B. Yashwanth, “WiTricity:Wireless Power Transfer By Non-radiative Method”, *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, vol. 11, n° 6, , p. 290-295, 2014. doi: 10.14445/22315381/IJETT-V11P255
- [9] J. Martínez Vila, «Transmisión de energía eléctrica por inducción para uso doméstico.» Trabajo de Grado, Universitat Politècnica de Catalunya, Catalunya, España, 2016.
- [10] G. F. Cuñarro Podestá y G. F. Flieller Alfonso, “Transferencia inalámbrica de energía por acople inductivo con seguimiento del punto de máxima eficiencia”, Trabajo de Grado, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay, 2018. [En línea]. Disponible: <https://iie.fing.edu.uy/publicaciones/2018/CF18/>. [Último acceso: 1 Noviembre 2020]
- [11] M. J. Moser, T. Bretterkieber, H. Zangl y G. Brasseur, “Strong and Weak Electric Field Interfering: Capacitive Icing Detection and Capacitive Energy Harvesting on a 220-kV High-Voltage Overhead Power Line”, *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, Vol. 58, No. 7, 2011, pp. 2597-2604.
- [12] F. Guo, H. Hayat y J. Wang, “Energy harvesting devices for high voltage transmission line monitoring”, de *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, Detroit, MI, USA, USA, 2011. doi: 10.1109/PES.2011.6039037
- [13] C. Gil Martínez, «Regresión lineal múltiple,» Cristina Gil Martínez | Data Science with R, Mayo 2018. [En línea]. Disponible:

- https://rpubs.com/Cristina_Gil/Regresion_Lineal_Multiple.
[Último acceso: 20 Junio 2019].
- [14] F. E. Harrell Jr., *Regression Modeling Strategies. With Applications to Linear Models, Logistic and Ordinal Regression, and Survival Analysis*, Springer International Publishing, 2015.
- [15] T. J. Hastie, "Generalized additive models", de *Statistical models in S.*, Routledge, 2017, pp. 249-307.
- [16] M. Henriksson, J.-F. Daigle, F. Théberge, M. Châteauneuf y J. Dubois, "Laser guiding of Tesla coil high voltage discharges", *Optics express*, vol. 20, n° 12, pp. 12721--12728, 2012. doi: 10.1364/OE.20.012721
- [17] G. K. Tso y K. K. Yau, "Predicting electricity energy consumption: A comparison of regression analysis, decision tree and neural networks", *Energy*, vol. 32, n° 9, pp. 1761--1768, 2007. doi: 10.1016/j.energy.2006.11.010
- [18] G. Guo, G. Tong, L. Lu y S. Liu, "Iterative reconstruction algorithm for the inverse problems in electrical capacitance tomography", *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 64, pp. 204--212, 2018. doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2018.10.010
- [19] B. Yazici y S. Yolacan. "A comparison of various tests of normality", *Journal of Statistical Computation and Simulation*, vol. 77, n° 2, pp. 175-183, 2007. doi: 10.1080/10629360600678310
- [20] G. L. Johnson, Solid State Tesla Coil, Manhattan, Kansas, 2001. [En línea]. Disponible: <http://www.ece.k-state.edu/people/faculty/gjohnson/>