

Generación Comunitaria Rural

Abstract

La energía eléctrica es un recurso esencial para el progreso de los pueblos. Es por ello que tanto los gobiernos, como las empresas privadas de energía tienen la responsabilidad social de suministrar en forma eficiente la misma a todos los puntos del país para el desarrollo socio económico de todas las regiones que lo integran, mediante líneas de transmisión en alta tensión.

Dichas líneas son las encargadas de transmitir la energía eléctrica desde los centros de generación a los grandes consumos de carga. Este transporte se hace cubriendo extensas distancias generalmente por lugares cuya topografía es bastante inhóspita y sus vías de comunicación suelen ser precarias. En tales regiones suele haber pequeños poblados rurales aislados por los motivos antes mencionados. Estas poblaciones representan consumos insignificantes que si bien están próximos a las líneas de alta tensión, no se justifica económicamente la colocación de subestaciones de rebajes tradicionales.

El presente trabajo expone el estudio del aprovechamiento de la energía derivable por acoplamiento electrostático como alternativa a considerar para la alimentación de estas cargas, para lo cual se utiliza el modelo de campo electromagnético cuasiestático.

El propósito final de esta investigación es el diseño de un sistema capaz de captar la energía del campo eléctrico circundante a una línea de AT y transformarla en energía eléctrica en niveles de tensión apropiados para satisfacer consumos del orden de 5kVA.

Palabras claves

- Ecuaciones de Maxwell
- Campo Eléctrico Cuasiestático
- Línea Aérea de Alta Tensión
- Inducción Electrostática
- Dispositivo de captación
- Electrificación Rural
- Acoplamiento Capacitivo
- Conductor aislado

Objetivo:

El objetivo de esta investigación consiste en diseñar un sistema capaz de captar la energía del campo eléctrico circundante a una línea de AT y transformarla en energía eléctrica en niveles de tensión apropiados para satisfacer consumos del orden de 5kVA.

Introducción teórica:

Todos los fenómenos electromagnéticos clásicos (no cuánticos) se pueden describir a partir de las **ecuaciones de Maxwell**:

$$\begin{aligned}
 [1] \quad \nabla \cdot \mathbf{D}(\mathbf{r}, t) &= \rho(\mathbf{r}, t) && \text{(ley de Gauss eléctrica)} \\
 [2] \quad \nabla \cdot \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) &= 0 && \text{(ley de Gauss magnética)} \\
 [3] \quad \nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) + \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) &= 0 && \text{(Ley de Faraday)} \\
 [4] \quad \nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) &= \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{D}(\mathbf{r}, t) + \mathbf{j}(\mathbf{r}, t) && \text{(Ley de Maxwell-Ampère)}
 \end{aligned}$$

Donde generalmente las incógnitas son los campos vectoriales:

E: campo eléctrico (V/m),

D: campo de desplazamiento (C/m²),

H: campo magnético (A/m)

B: campo de inducción magnética (T).

Estos campos conforman el campo electromagnético. Las dos ecuaciones del rotor (Faraday y Maxwell-Ampère) aseguran que hay una dependencia mutua entre campos eléctricos y magnéticos variables en el tiempo, de manera que en este caso ambos campos están interrelacionados. Sólo en el caso de campos estáticos (que no varían en el tiempo) campo eléctrico y magnético son independientes entre sí.

Este es un conjunto de ecuaciones diferenciales vectoriales lineales acopladas inhomogéneas. En general su resolución es bastante difícil.

Soluciones de las ecuaciones de Maxwell. Potenciales retardados

En el vacío es posible hallar una solución general de las ecuaciones de Maxwell en términos de los potenciales electrodinámicos o potenciales retardados: vectorial \mathbf{A} y escalar Φ , que se pueden deducir de las ecuaciones de Maxwell:

$$[5] \quad \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = -\nabla\Phi(\mathbf{r}, t) - \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{A}(\mathbf{r}, t) \qquad [6] \quad \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = \nabla \times \mathbf{A}(\mathbf{r}, t)$$

Estos potenciales no son independientes entre sí, sino que están relacionados por la llamada condición de Lorentz:

$$[7] \quad \nabla \cdot \mathbf{A} + \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0} \frac{\partial \Phi}{\partial t} = 0$$

Con la introducción de los potenciales retardados, las ecuaciones de Maxwell llevan a las siguientes ecuaciones de onda vectoriales inhomogéneas:

$$[8] \quad \nabla^2 \Phi(\mathbf{r}, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \Phi(\mathbf{r}, t) = -\frac{\rho(\mathbf{r}, t)}{\epsilon_0} \qquad [9] \quad \nabla^2 \mathbf{A}(\mathbf{r}, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \mathbf{A}(\mathbf{r}, t) = -\mu_0 \mathbf{j}(\mathbf{r}, t)$$

Donde $c = 1/\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$. Estas ecuaciones tienen las siguientes soluciones particulares:

$$[10] \quad \Phi(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_V \frac{\rho(\mathbf{r}', t')}{R} dV' \qquad [11] \quad \mathbf{A}(\mathbf{r}, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \frac{\mathbf{j}(\mathbf{r}', t')}{R} dV'$$

En condiciones particulares la resolución de las ecuaciones de Maxwell se pueden resolver de una manera mucho más sencilla. Uno de esos casos es el caso cuasiestático, el que exponemos a continuación.

Caso cuasiestático o cuasiestacionario

Para fenómenos variables en el tiempo se requiere el análisis de campos con los potenciales retardados, las corrientes dejan de ser estacionarias, y las reglas de Kirchhoff dejan de cumplirse. Sin embargo, podemos pensar que para frecuencias muy bajas el comportamiento de los sistemas no debe diferir demasiado del comportamiento a corriente continua, y que el pasaje de los fenómenos circuitales puros a los fenómenos de radiación debe ser gradual y paulatino a medida que aumenta la frecuencia. Este razonamiento nos lleva a analizar el caso cuasiestático o cuasiestacionario, donde la frecuencia es tan baja que podemos aproximar las ecuaciones de Maxwell a su formato estático/ estacionario, pero conservando la dependencia temporal:

$$[12] \quad \nabla \cdot D(r, t) = \rho(r, t)$$

$$[13] \quad \nabla \cdot B(r, t) = 0$$

$$[14] \quad \nabla \times E(r, t) = 0$$

$$[15] \quad \nabla \times H(r, t) = j(r, t)$$

$$[16] \quad \nabla \cdot j = 0$$

$$[17] \quad E(r) = -\nabla\Phi(r)$$

$$[18] \quad B(r) = \nabla \times A(r)$$

$$[19] \quad \nabla^2\Phi(r, t) = -\frac{\rho(r, t)}{\epsilon_0} \Rightarrow \Phi(r, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_V \frac{\rho(r', t)}{R} dV'$$

$$[20] \quad \nabla^2 A(r, t) = -\mu_0 j(r, t) \Rightarrow A(r, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \frac{j(r', t)}{R} dV'$$

Obsérvese que ha desaparecido la distinción entre tiempo fuente y tiempo campo, es decir que en la aproximación cuasiestática los efectos son instantáneos, como en el caso estático.

Es posible aplicar la aproximación cuasiestática o cuasiestacionaria de las ecuaciones del electromagnetismo cuando la mínima longitud de onda significativa del espectro de Fourier de los campos involucrados (que en medios lineales es el espectro de Fourier de la fuente de campo), es muy grande frente a las dimensiones de la fuente (por ejemplo para 50 Hz, la longitud de onda es aproximadamente 6000 km). Siendo D la distancia entre fuente y objeto se puede adoptar como condición final:

$$[21] \quad \lambda_{\min} > 10D$$

Principio de superposición

Un principio en que se basa el modelo utilizado en este trabajo es el de el principio de superposición. Los cuerpos cargados generan campo eléctrico. Cuando hay más de un cuerpo cargado presentes en forma simultánea la experiencia indica que puede utilizarse el principio de superposición. Según este principio el efecto obtenido por la presencia simultánea de varias causas es la superposición de los efectos causados por cada causa actuando individualmente. En el ejemplo de dos cargas puntuales q_1 y q_2 presentes simultáneamente en posiciones estáticas (respecto a una masa inercial), el campo creado por la distribución de carga es la superposición (suma vectorial) de los campos creados individualmente por cada carga puntual tomada como única en el universo.

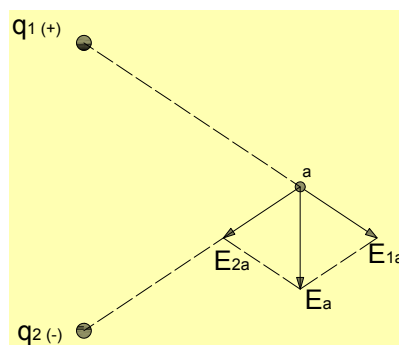


Figura 2

Fenómeno de inducción – campo perturbado

Desde los primeros descubrimientos de la electricidad se comprobó que cuando un objeto conductor es inmerso en un campo eléctrico se origina en él una migración de carga, las que se depositan a lo largo de toda su superficie exterior. Este fenómeno recibe el nombre de “inducción electrostática”.

En efecto, las cargas en la superficie de dicho cuerpo crean un campo eléctrico en su vecindad deformando el campo exterior. La intensidad de esta variación local depende del radio de curvatura del cuerpo perturbador. Así, el hecho de ubicar un objeto en el ambiente, modifica la condición inicial de distribución de campo eléctrico. En el caso particular de una esfera de metal, el cálculo muestra que la intensidad máxima de la perturbación del campo eléctrico alcanza tres veces al valor del campo uniforme.

Método de las imágenes

La tierra es un conductor eléctrico. Por lo tanto un conductor aislado y tierra se comportan como un capacitor formado por dos electrodos: uno, un cilindro y el otro un plano paralelo equipotencial.

Si en el conductor existe una carga "+q" se tendrá en tierra una carga "-q" distribuida (figura 3). Se puede suponer a la misma concentrada en un conductor que denominamos conductor imagen, ubicado a una profundidad "h" del nivel del suelo y que produce el mismo campo eléctrico. El modelo equivalente es el mostrado en la figura 4.

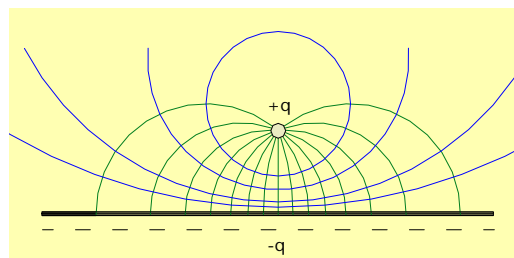


Figura 3

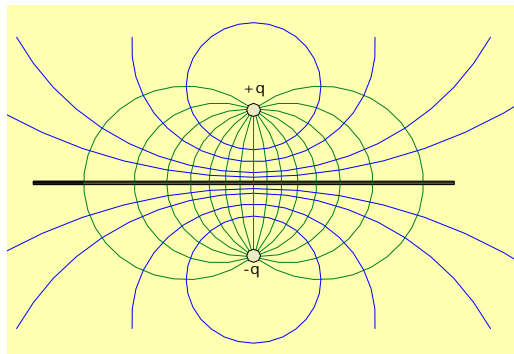


Figura 4

Coefficientes de potencial y de capacidad.

Cuando existe un conjunto de conductores cargados a distancias no muy grandes entre sí, la distribución de carga y el potencial de cada uno depende de todos los otros debido a la redistribución de carga producida por la inducción electrostática. No es posible entonces usar la superposición de los potenciales creados por cada conductor individual sino que para analizar esta situación se deben utilizar los llamados coeficientes de potencial, que vamos a introducir.

Sean N conductores, $i = 1, 2, \dots, N$. El potencial electrostático que crean en un punto cualquiera del espacio es:

$$[22] \quad \Phi(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^N \oint_{S_i} \frac{\sigma_i(r')}{R_i} ds' \quad \text{Donde } R_i = r - r'_i$$

En particular, el potencial del conductor j -ésimo del conjunto será:

$$[23] \quad \Phi_j = \Phi(r_j) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^N \oint_{S_i} \frac{\sigma_i(r')}{R_{ij}} ds'$$

Supongamos inicialmente que todos los conductores están descargados, salvo el i -ésimo. Entonces:

$$[24] \quad \Phi_j^{(i)} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^N \oint_{S_i} \frac{\sigma_i(r')}{R_{ij}} ds'$$

es el potencial del conductor j -ésimo debido únicamente a la carga en el i -ésimo conductor.

Si modificamos ahora la carga de este conductor $Q_j \rightarrow \lambda Q_j$ ($\sigma_i \rightarrow \lambda \sigma_i$) se observa de la correspondiente ecuación que $\Phi_j^{(i)} \rightarrow \lambda \Phi_j^{(i)}$, es decir, hay una relación lineal entre la carga y el potencial que esa carga crea. Podemos escribir entonces: $\Phi_j^{(i)} = P_{ij} Q_i$ donde P_{ij} es un factor de proporcionalidad que depende de la geometría de la disposición de los dos conductores.

Si ahora damos carga a los otros conductores, podemos calcular el potencial del j -ésimo por superposición:

$$[25] \quad \Phi_j = \sum_{i=1}^N P_{ij} Q_i$$

Los coeficientes $\{P_{ij}\}$ de esta suma son los llamados coeficientes de potencial del conjunto de conductores.

Este es un sistema de ecuaciones lineales que puede expresarse en forma matricial:

$\Phi = [P]Q$ donde $\Phi = [\Phi_1 \Phi_2 \Phi_3 \dots \Phi_N]^T$ y $Q = [Q_1 Q_2 Q_3 \dots Q_N]^T$ son los vectores de potenciales y cargas sobre los conductores y $[P]$ es la matriz de los coeficientes P_{ij} (también conocida como matriz de Maxwell).

La ecuación matricial $\Phi = [P]Q$ puede invertirse para expresar las cargas de los conductores en función de sus potenciales:

$$[26] \quad Q = [P]^{-1} \Phi = [C] \Phi$$

donde los coeficientes diagonales C_{ii} de la matriz $[C]$ se conocen como coeficientes de capacidad y los no diagonales C_{ij} ($i \neq j$) coeficientes de inducción. Todos estos coeficientes tienen dimensiones de capacidad.

$$[27] \quad Q_i = \sum_{j=1}^N C_{ij} \Phi_j$$

Ahora bien, consideremos un cuerpo conductor, ubicado cerca de una línea trifásica. Las fases se encuentran a los potenciales V_1 , V_2 y V_3 respectivamente. Pueden considerarse dos casos extremos:

- (1) El cuerpo está completamente aislado de tierra
- (2) El cuerpo está conectado a tierra mediante un conductor.

Aplicando la ecuación [27] que relaciona el potencial V_0 y la carga Q relativa al cuerpo se tiene:

$$[28] \quad Q = \Phi_0 \cdot C_0 + \Phi_1 \cdot C_{10} + \Phi_2 \cdot C_{20} + \Phi_3 \cdot C_{30}$$

En la condición (1): con $Q = 0$ se tiene:

$$[29] \quad \Phi_0 = - \frac{\Phi_1 \cdot C_{10} + \Phi_2 \cdot C_{20} + \Phi_3 \cdot C_{30}}{C_0}$$

En la condición (2): con $Q \neq 0$ se tiene:

$$[30] \quad Q = \Phi_1 \cdot C_{10} + \Phi_2 \cdot C_{20} + \Phi_3 \cdot C_{30}$$

$$[31] \quad i_0 = -j \cdot \omega \cdot Q$$

$$[32] \quad \Rightarrow i_0 = -j \cdot \omega \cdot (\Phi_1 \cdot C_{10} + \Phi_2 \cdot C_{20} + \Phi_3 \cdot C_{30})$$

$$[33] \quad \Phi_0 = \frac{i_0}{j \cdot \omega \cdot C_0}$$

$$[34] \quad i_0 = j \cdot \omega \cdot C_0 \cdot \Phi_0$$

$$[35] \quad S = i_0 \cdot \Phi_0$$

Desarrollo del caso:

Para el desarrollo del cálculo numérico se utilizará una línea típica de 500kV de disposición coplanar y de simple terna. Los parámetros a utilizar serán los siguientes:

Conductor Principal	Cantidad de subconductores	4
	Diámetro de cada Conductor	26,68 mm
	Flecha máxima	14,5 m
Hilo de Guardia	Cantidad de Hilos de Guardia	2
	Diámetro del hilo de guardia	10.30 mm
	Flecha del hilo de guardia	14,5 m

Los datos geométricos de la línea se muestran en la figura 5.

La altura efectiva y el radio equivalente del conjunto de subconductores es:

$$[36] \quad h_{eq} = h - \frac{2}{3}f = 16,58\text{m} \quad [37] \quad r_e = R \cdot n \sqrt{\frac{nr}{R}} = 0,2036\text{m}$$

Donde:

- h_{eq} = altura efectiva de la línea
- h = Altura de la línea en la torre
- f = flecha de conductor
- r_e = radio equivalente
- R = radio del haz de conductores
- r = radio del conductor
- n = cantidad de conductores

La tensión inducida en un conductor aislado paralelo a la línea ubicado a una distancia "d" desde el eje de la línea y una altura "h" sobre el terreno se calcula mediante la ecuación [29]. La corriente y la potencia captada por el dispositivo se calcula mediante las ecuaciones [34] y [35] respectivamente.

Para poder encontrar la ubicación óptima del conductor que garantice los niveles de tensión inducida y energía necesarios para el fin propuesto y teniendo en cuenta las distancias mínimas de seguridad nos valemos de la familia de curvas representadas en la figura 6. Cada curva (calculadas según las ecuaciones anteriores) representa la tensión inducida en el conductor aislado paralelo a la línea, para una distancia horizontal dada, en función de la altura.

Del análisis técnico económico de las curvas mencionadas se adopta una de las soluciones técnico-económica se da para una distancia d igual a 14,54 metros y una altura de 10,85 metros con respecto al nivel de suelo:

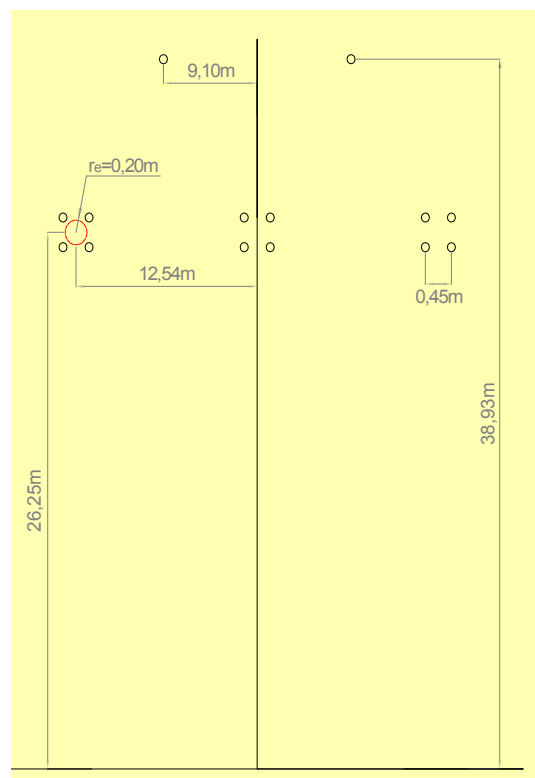


Figura 5

Tensión inducida: 70,27kV

Corriente inducida: 69,94mA (para una longitud de conductor aislado de 500m)

Potencia resultante: 4,915 kVA

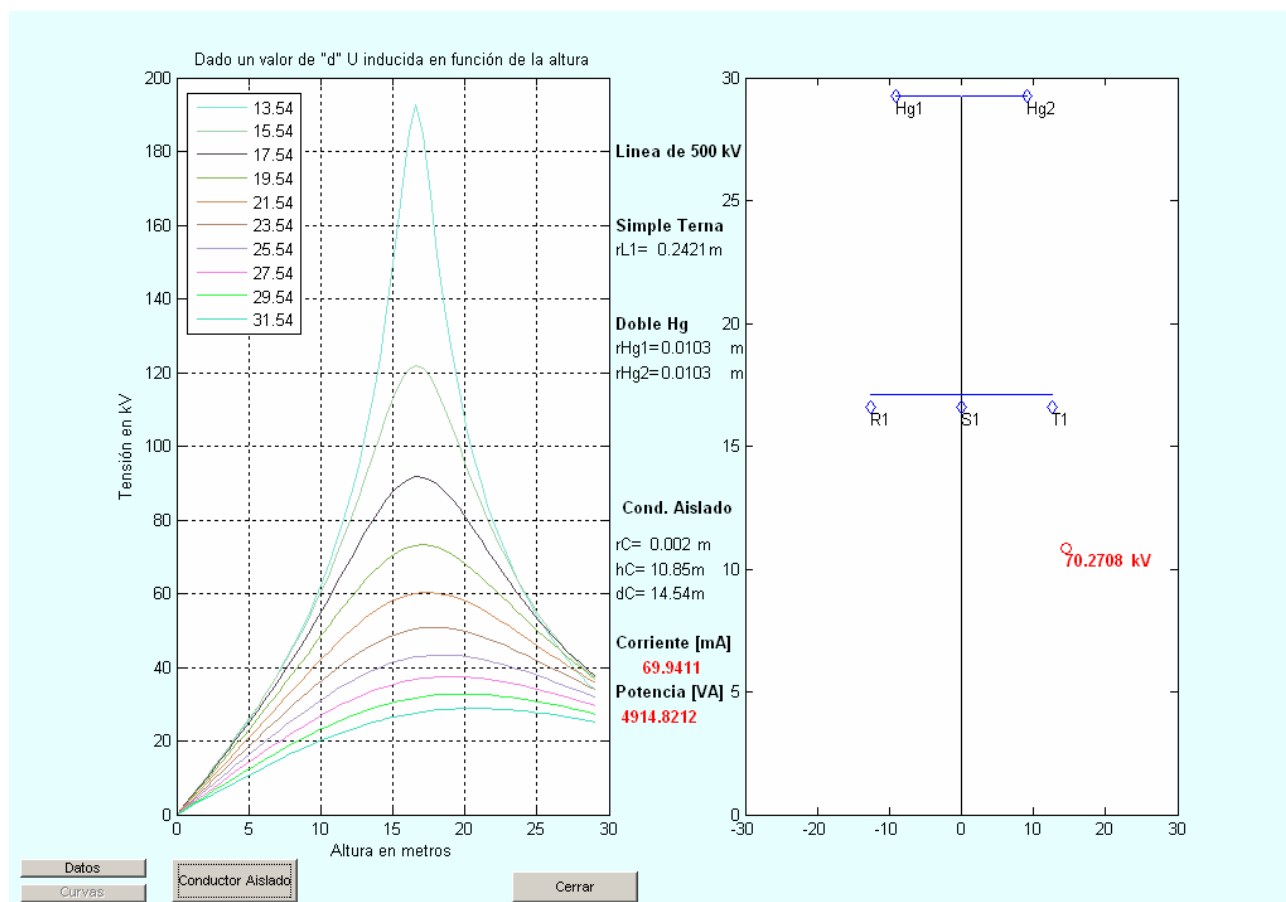


Figura 6

Para validar los cálculos desarrollados se contrastó el algoritmo utilizado para este trabajo con el ejemplo de la página 15 del documento del CIGRE que figura en el ítem tres de la bibliografía adjunta. Este consta de una línea aérea de 400kV de disposición coplanar simple terna y una cañería de 0,6m de diámetro a 1 metro de altura y a una distancia horizontal con respecto al eje de la línea de 40m con una longitud de 4km.

Documento CIGRE	Programa desarrollado
620-800 V (calculado por diferentes métodos)	665 V
23..30 mA	24,5 mA

Dispositivo captador de energía electrostática:

El diseño básico del dispositivo consiste en un conductor paralelo a la línea soportado por una estructura poste-aislador. A éste se conecta el primario de un transformador que rebaja el nivel de tensión a 220V, para su utilización. A su vez con el fin de mantener la tensión constante en la carga se colocará un dispositivo electrónico de regulación de tensión automático realimentado a lazo cerrado. El esquema del circuito se muestra en la Figura 7.

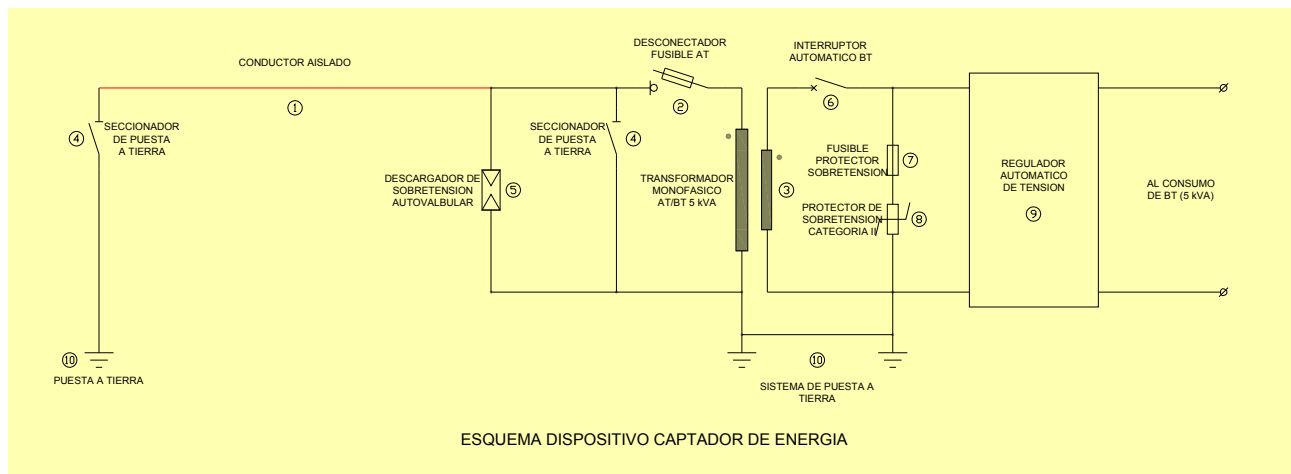


Figura 7

Consideraciones de diseño del dispositivo.

Los elementos principales para la utilización de la energía y auxiliares para la seguridad tanto de las personas como del equipamiento y los equipos de maniobra se muestran en la figura 8

- 1- Conductor Aislado
- 2- Desconectador Fusible
- 3- Transformador Monofásico 70 kV / 230 V – 5 kVA
- 4- Seccionador de Puesta a Tierra
- 5- Descargador de Sobretensión 74 kV – 15 kA
- 6- Interruptor Automático de Baja Tensión 25A
- 7- Fusible para el elemento protector de sobretensión de BT
- 8- Protector de Sobretensión para BT Categoría II
- 9- Regulador de Tensión Automático
- 10- Puesta a Tierra
- 11- Estructura Soporte

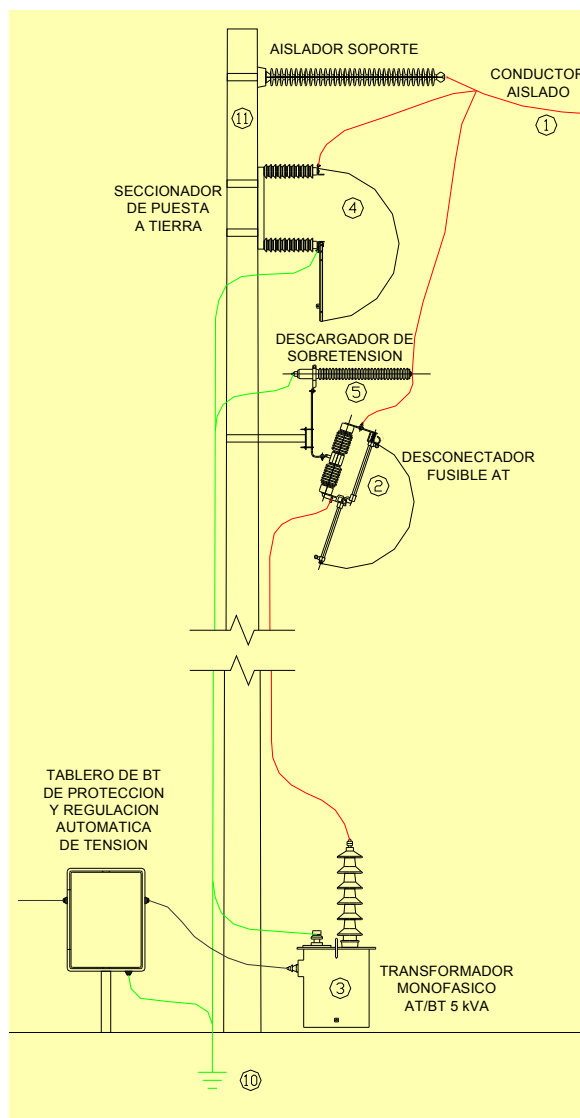


Figura 8

Conclusiones

Hemos demostrado hasta aquí, la factibilidad de aprovechar la energía disponible alrededor de las líneas de Alta Tensión de 500 kV, obteniendo una potencia aceptable para pequeños consumos rurales, lo que permitiría mejorar las condiciones de vida en zonas aisladas y alejadas en una vasta extensión, principalmente en nuestro país.

El sistema propuesto, consta de un tendido de línea auxiliar de 500 m y dos equipos auxiliares cuyo costo, mucho menor al de una línea rural desde una estación transformadora de rebaje hasta el punto de carga, permite la viabilidad económica que es el principal obstáculo para el abastecimiento de energía para este tipo de consumo.

Adicionalmente, dado el principio de acoplamiento electrostático que hemos propuesto, no es necesario desenergizar la línea de AT tanto para el montaje del sistema como para su mantenimiento posterior, pudiéndose trabajar sin tensión y respetando las medidas y procedimientos de seguridad de acuerdo a reglamentaciones vigentes.

Perspectivas a futuro

El equipo GeCoR, autor de este trabajo, se encuentra estudiando la posibilidad de reemplazar el tendido del conductor aislado por un dispositivo captador, redefiniendo una nueva geometría más eficiente y de menor dimensión, que facilite aún más la optimización del dispositivo planteado.

Referencias bibliográficas

1. Electric and magnetic fields produced by transmission systems – Working Group 01 (interference and fields) of Study Committee 36 (Interference) – CIGRÉ – 1980.
2. Transmission Line Reference Book. 345 kV and above. 2nd. Edition. EPRI, Palo Alto, 1982.
3. Electromagnetismo 2004 - Juan C. Fernández - Departamento de Física – Facultad de Ingeniería – UBA
4. Guide on the influence of high voltage AC power systems on metallic pipelines – Working Group 36.02 “Electromagnetic Compatibility with telecommunication circuits, low voltage networks and metallic structures” – CIGRE – 1995.
5. Power System Analysis. John Grainger, William Stevenson Jr. Ed. McGraw-Hill. 1994.
6. Fundamentos de electromagnetismo para ingeniería. Cheng. Editorial Pearson Educación. 1996
7. Sistemas de Potencia, Análisis y Diseño. Duncan Glover, Mulukutla Sarma. Ed. Thomson. 2003
8. Reglamentación de líneas aéreas exteriores de media y alta tensión – AEA – 2003.
9. Consejo federal de la Energía Eléctrica. www.cfee.gov.ar
10. Ente Nacional Regulador de la Electricidad. www.enre.gov.ar
11. Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico S.A. www.cammesa.com
12. Secretaría de Energía. <http://energia.mecon.gov.ar>
13. Alta Tensión y Sistemas de Transmisión. Luis Siegert. Ed. Limusa. 1989

Seudónimo: Grupo Ge.Co.R.