

Puesta a tierra en viviendas con sistema solar fotovoltaico como alternativa de generación de electricidad

Grounding of homes with solar photovoltaic system as an alternative for electricity generation

Miguel Castro Fernández^I *; Miriam Vilaragut Llanes^I; Yoandris Grandal Benitez^{II}; Yancarlos Rodríguez González^{III}

^IUniversidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba

^{II}Empresa Eléctrica de la Isla de la Juventud, Cuba

^{III}Empresa Eléctrica de Pinar del Río, La Palma, Cuba

*Autor de correspondencia: mcastro@electrica.cujae.edu.cu

Recibido: 15 de mayo de 2023

Aprobado: 8 de julio de 2023

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) 

RESUMEN/ABSTRACT

Los Sistemas Solares Fotovoltaicos (SSFV) forman parte de la estrategia de desarrollo del Gobierno cubano para diversificar la matriz energética disminuyendo la dependencia de combustibles fósiles e introduciendo tecnologías amigables con el medio ambiente. Su implementación a nivel residencial se ha confiado a la empresa COPEXTEL y uno de los problemas principales que enfrenta es la condición actual que presentan los sistemas eléctricos en las residencias cubanas que, en su mayoría, no poseen puesta a tierra ni protección diferencial que permita la protección ante corrientes de fuga. Otro problema, no menos importante, es el requerimiento de que el SSFV pueda ser utilizado cuando no haya conexión a la red, lo cual actualmente no es posible. Resulta necesario definir cuáles son los niveles de puesta a tierra requeridos, así como una solución que permita considerar un servicio eléctrico con alta vitalidad, aun cuando no haya alimentación desde la red eléctrica convencional.

Palabras clave: sistemas fotovoltaicos, inversores solares, puesta a tierra.

Solar Photovoltaic Systems (SSFV) are part of the Cuban Government's development strategy to diversify the energy matrix by reducing dependence on fossil fuels and introducing environmentally friendly technologies. Its implementation at the residential level has been entrusted to the company COPEXTEL. One of the main problems it faces is the current condition of the electrical systems in Cuban residences, most of which do not have grounding or differential protection to protect against leakage currents. Another problem, no less important, is the requirement that the SSFV can be used when there is no connection to the network, which is currently not possible. It is necessary to define the required grounding levels as well as a solution that allows considering an electrical service with high vitality, even when there is no power supply from the conventional electrical grid.

Key words: photovoltaic systems, solar inverters, grounding.

INTRODUCCIÓN

La generación de electricidad, a partir de fuentes renovables de energía (FRE) puede ser llevada tanto a pequeña escala en hogares o edificios particulares, o a una escala mayor en una empresa o en la propia red eléctrica. En los momentos actuales, en Cuba, se ha dado prioridad a la integración de energía distribuida proveniente de fuentes renovables en pequeña o mediana escala a sus redes eléctricas existentes; sin embargo, la presencia de estos sistemas de generación, del lado del cliente, aún no tienen la presencia que debería tener como una de las formas de eliminar el uso de los combustibles fósiles para el consumo de electricidad, entre los cuales debe ser considerada la presencia de sistemas solares fotovoltaicos (SSFV) a nivel residencial.

Cómo citar este artículo:

Miguel Castro Fernández, et al. Puesta a tierra en viviendas con sistema solar fotovoltaico como alternativa de generación de electricidad. Ingeniería Energética. 2023. 44 (2), mayo/agosto. ISSN: 1815-5901.

Sitio de la revista: <https://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE/index>

Cuba se ubica en una zona de muy alta actividad de descargas eléctricas atmosféricas (DEA), por lo que la presencia de un SSFV, a cualquier nivel, debe tener en consideración las situaciones de riesgo que, para los equipos que la conforman y para la propia instalación, ellas representan, así como requiere de una tierra efectiva como referencia para la operación correcta del inversor que la compone, a lo que hay que agregar su alta sensibilidad ante las variaciones de tensión que se presenten, tanto en la operación normal de la red como ante sobretensiones que lleguen a través de ella [1-3]. En el caso de las viviendas cubanas, normalmente, estas no poseen sistemas de puesta a tierra en las mismas, por lo que, ante la posible solicitud o compra, e instalación, de un SSFV en la misma, el tema debe ser analizado cuidadosamente.

En la actualidad, la Unión Eléctrica (UNE) ha exigido que la puesta a tierra de la instalación fotovoltaica sea de 5 ohm o menor; estudios realizados hace varios años en el CIPEL demostraron la necesidad de que la puesta a tierra de una vivienda conectada a la red eléctrica de distribución de la UNE debe ser del mismo orden, o mayor, del valor de la puesta a tierra del centro de transformación (transformador) que la alimenta, para evitar que las sobretensiones que se originen por alguna causa desde la red de alimentación, ya sea por impacto directo o por inducción (en alguna de las fases del sistema de distribución primario o en el neutro), de una DEA, pueda ser peligrosa para las personas y equipos en la vivienda. Así mismo, la presencia de un sistema de generación de electricidad en una vivienda requiere de una puesta a tierra de protección para las personas y equipos existentes en la casa, ante la posibilidad de que se generen tensiones superiores a lo establecido como tensión de contacto en el Reglamento Electrotécnico Cubano, en su versión actualizada del 2018 [4, 5], (NC 800. Reglamento Electrotécnico Cubano para Instalaciones Eléctricas en Edificaciones, s.p. Norma Cubana Obligatoria. La Habana, Cuba:s.n., 2017).

Teniendo en cuenta lo anteriormente expresado, es válido preguntarse: ¿es realmente necesario el requerimiento de que el nivel de la puesta a tierra, de un SSFV en una vivienda, sea del orden de los 5 ohm? ¿Cómo puede afectar este criterio al valor equivalente de aterramiento que se vería desde el sistema al incluirse una puesta a tierra en la entrada de la acometida de la vivienda, en el metro contador? ¿Cómo determinar qué niveles de aterramiento requeriría la instalación de un SSFV a instalarse en una vivienda, teniendo en consideración la necesidad de instalar, además, una puesta a tierra en el metro contador a la entrada de la acometida?

MATERIALES Y MÉTODOS

El problema de la conexión a tierra en las instalaciones residenciales en Cuba

Como se conoce, los esquemas de puesta a tierra en BT determinan la forma de conectar a tierra el secundario del transformador de MT/BT y las diversas maneras de poner a tierra las masas de la instalación conectada a él, con el objetivo de eliminar la posibilidad de aparición de una tensión de contacto, que por su magnitud y duración pueda causar daños a personas y equipos [6-10]. Según Lacroix B. Calvas R. (2000). Cuaderno Técnico n° 172. Los esquemas de conexión a tierra en BT (régimenes de neutro), la identificación de los tipos de esquema se expresa con dos letras:

- La primera letra identifica la conexión del neutro del transformador, y presenta dos casos posibles: T para conectado a tierra, e I para aislado de tierra.
- La segunda letra identifica el tipo de conexión de las masas de los receptores, y también presenta dos casos posibles: T para masa conectada directamente a tierra, y N para masa conectada al neutro en el origen de la instalación; instalación que ha de estar conectada a tierra (figura 1).

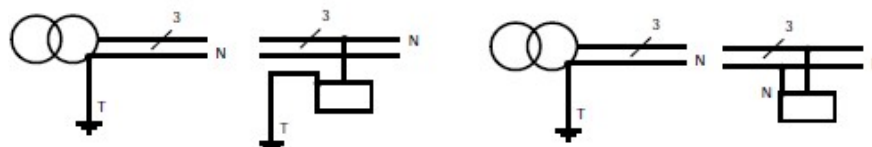


Fig. 1. Modos de conexión del neutro de un transformador a tierra; y modo de conexión de masas de los receptores eléctricos. Fuente: Lacroix B. Calvas R. (2000). Cuaderno Técnico n° 172. Los esquemas de conexión a tierra en BT (régimenes de neutro)

La combinación de estas dos letras da tres configuraciones posibles: TT: neutro del transformador T y masa T; TN: neutro del transformador T y masa N; IT: neutro del transformador I y masa T, tal y como se muestra en la figura 2.

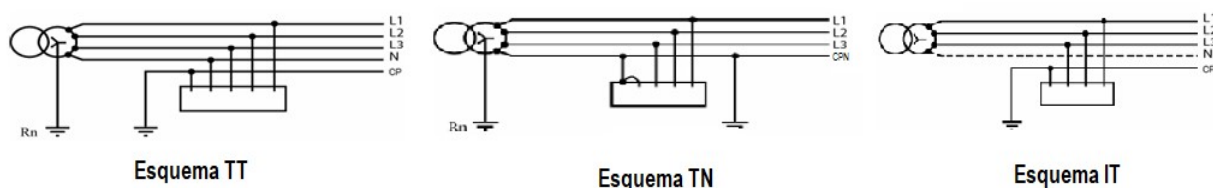


Fig. 2. Variantes de esquemas de conexión del neutro a tierra en una instalación. Fuente: NC 800. Reglamento Electrotécnico Cubano para Instalaciones Eléctricas en Edificaciones

Sin embargo, es de notar que el esquema TN, según el Reglamento Electrotécnico Cubano para Instalaciones

Eléctricas en Edificaciones, puede llevar a varios subesquemas:

- TN-C: si los conductores del neutro N y el conductor de protección CP coinciden (CPN).
- TN-S: si los conductores del neutro N y el conductor de protección CP están separados.
- TN-C-S: utilización de un-TN-S, aguas abajo de TN-C, ya que, al revés, está prohibido.

En la figura 3, pueden ser observados estos esquemas.

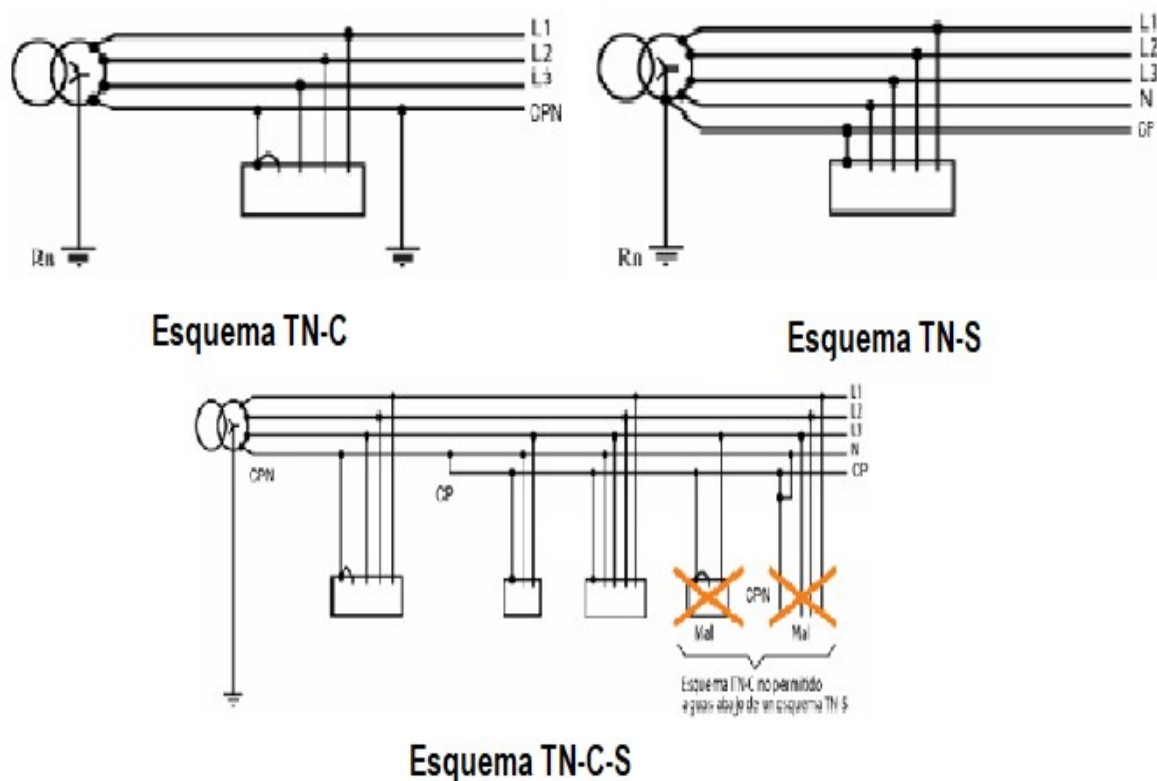


Fig. 3. Subesquemas de conexión del neutro a tierra bajo el concepto de un esquema TN- Fuente: NC 800. Reglamento Electrotécnico Cubano para Instalaciones Eléctricas en Edificaciones

En Cuba, el Código Electrotécnico Cubano establece, de modo general, como esquema de puesta a tierra el tipo TN para baja tensión (BT), con marcada preferencia hacia el TN-S. Sin embargo, al no existir aterramiento en la vivienda, cualquier análisis que se haga sobre un aterramiento en la misma, transformara la puesta a tierra en un esquema de tipo TN-C-S, pues requerirá conectar un conductor adicional que sería el conductor PE a la puesta a tierra.

Sistemas solares fotovoltaicos a instalar en una vivienda cubana

Los SSFV a instalarse en una vivienda pueden ser de dos tipos: aislados y conectados a la red.

- Sistema fotovoltaico aislado: compuesto, de manera general, por estructuras soporte, módulos solares fotovoltaicos, cargador(es) e inversor(es) solar(es), banco de baterías, sistema de comunicación, protecciones eléctricas, cableado y sistema de puesta a tierra. Desde el punto de vista de su funcionamiento, se considera que es independiente de la red eléctrica.
- Sistema fotovoltaico con conexión a red; son aquellos que se conectan a los sistemas eléctricos de potencia (SEP) en cualquiera de sus niveles de trabajo; por regla general son más económicos, al no necesitar sistemas de respaldo ya que esa función la realiza el propio sistema eléctrico, así como es el que menos equipamiento requiere, estando compuesto, fundamentalmente, por las estructuras de soporte, módulos solares fotovoltaicos, inversor(es) solar(es), cableado, protecciones eléctricas y el sistema de puesta a tierra. Cuando no sufre ninguna carga, este sistema inyecta toda la energía generada al SEP. Por lo general, estos SSFV se desconectan, por protección, cuando la red convencional falla, no trabajando en modo isla; por tal razón, y a solicitud de clientes o requerimientos de servicio, existe una variante que utiliza un inversor híbrido que permite tener la conexión de un banco de baterías para que, al ocurrir este fenómeno, el SSFV siga trabajando al desconectarse, eléctricamente, la red. Este inversor híbrido desconecta el SSFV de la red, pero al tener un banco de baterías, funciona, en esos instantes, como un sistema FV aislado (ver figura 4).

Una muestra de las componentes de estos SSFV se presenta en la figura 5.

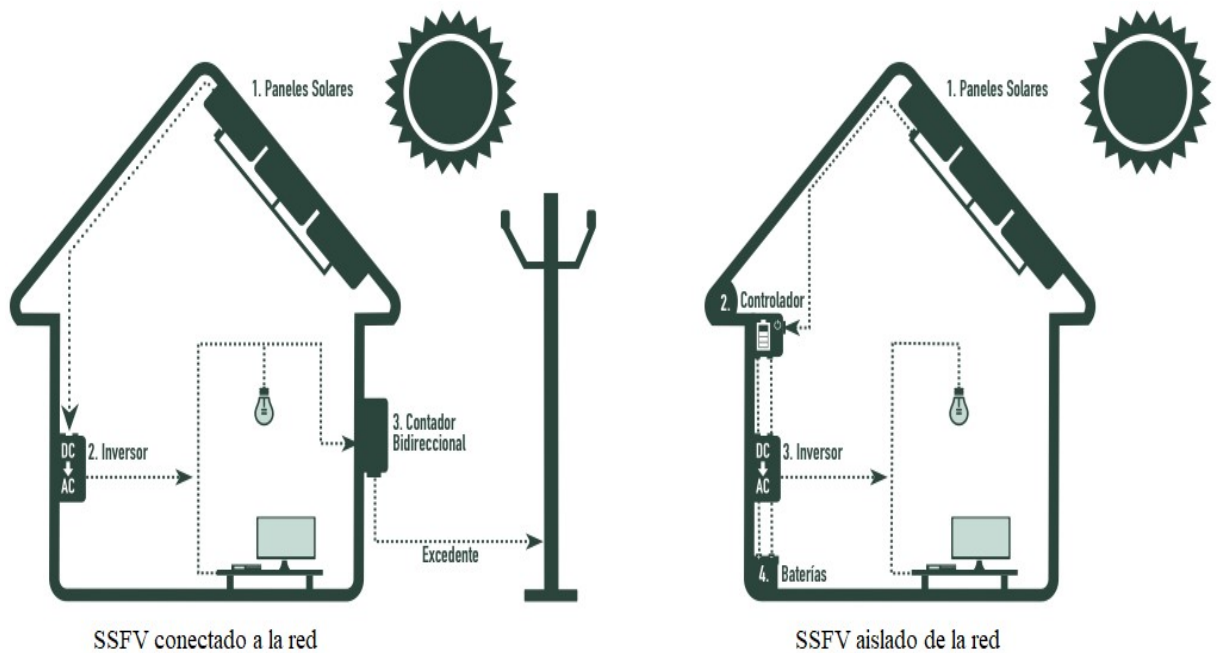
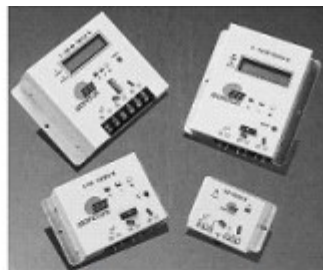


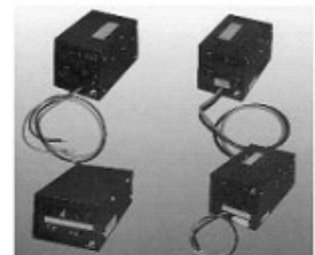
Fig.4. Tipos de SSFV que pueden ser instalados en las viviendas. Fuente: Instalaciones de energía solar fotovoltaica. (s.f). América Fotovoltaica



Módulos o paneles FV



Reguladores FV



Inversores FV



BATERÍAS AGM



BATERÍAS MONOBLOCK



BATERÍAS ESTACIONARIAS



BATERÍAS DE LITIO

Diferentes modelos de baterías utilizados en los SSFV

Fig. 5. Partes componentes de un SSFV. Fuente: Castro M. (2021). Monografía Curso de Formación en Sistemas Fotovoltaicos. Centro de desarrollo de Automatización Industrial (CEDAI)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Planteamiento del problema para el análisis del esquema de puesta a tierra que debe tener una vivienda

a. Caso 1. Inducción, en el neutro de la instalación, de la corriente asociada a una DEA

Dados los requerimientos que se establecen, desde el punto de vista de seguridad y protección, para un SSFV, y lo que implica su instalación en una vivienda, ante las posibles sobretensiones que pueden afectar a todo el esquema (SSFV+vivienda), un primer paso es analizar la posible simulación de cada componente y fenómeno a analizar al respecto. El esquema básico de la instalación a analizar se presenta en la figura 6, considerando el impacto de una DEA en el neutro de la red eléctrica, del lado de BT que alimenta la vivienda.

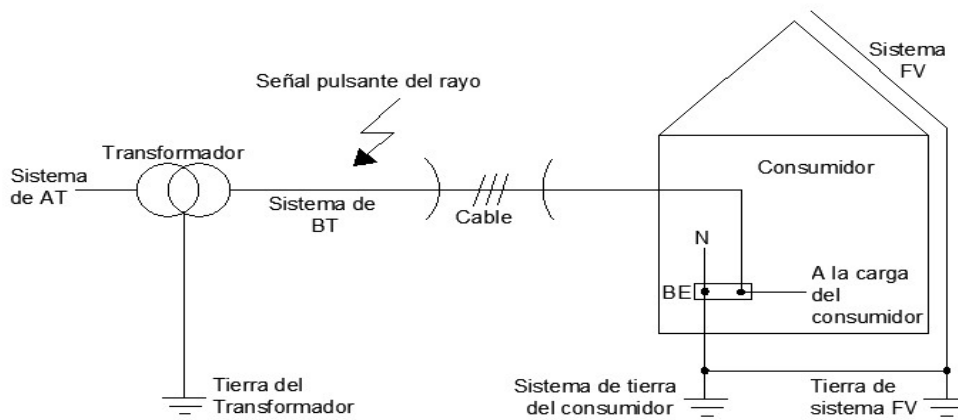


Fig.6. Esquema eléctrico del objeto de análisis. Fuente: elaboración propia

Uno de los primeros elementos a simular es la DEA, que representada por una onda de 10/350 microsegundos (μs), se simula a partir de tres subsistemas formados por el bloque "Function" en SIMULINK de MatLab, el cual permite evaluar la ecuación matemática que representa de la DEA en un intervalo que va desde 0 a 350 μs , y con un valor de corriente de 100 kA, lo cual permite obtener los resultados que se muestran en la figura 7.

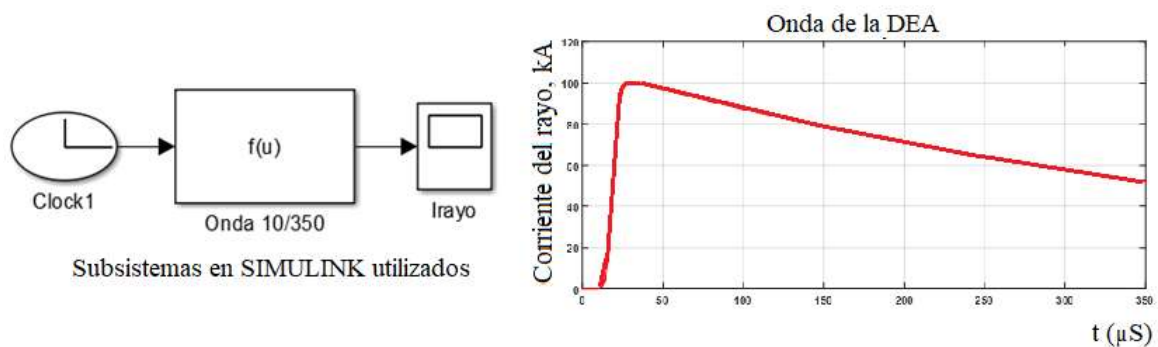


Fig.7. Simulación de la onda de una DEA en SIMULINK. Fuente: De Armas García, Fernando J. (2002). Simulación Digital de un sistema de protección contra descargas atmosféricas en una instalación de baja tensión. Tesis de Maestría

Estudios realizados anteriormente en el CIPEL han abordado esta temática, llegando a determinadas conclusiones que son punto de partida para los análisis que se realizan en este trabajo [Granda Y.; Rodríguez Y. (2022). Nivel de aterramiento para los sistemas solares fotovoltaicos en viviendas, Trabajo de Diploma].

Considerando la presencia de la DEA como una fuente de corriente, es factible llevar a un circuito eléctrico el esquema mostrado en la figura 8, circuito que se presenta en la figura 9, junto con los valores de las componentes utilizadas.

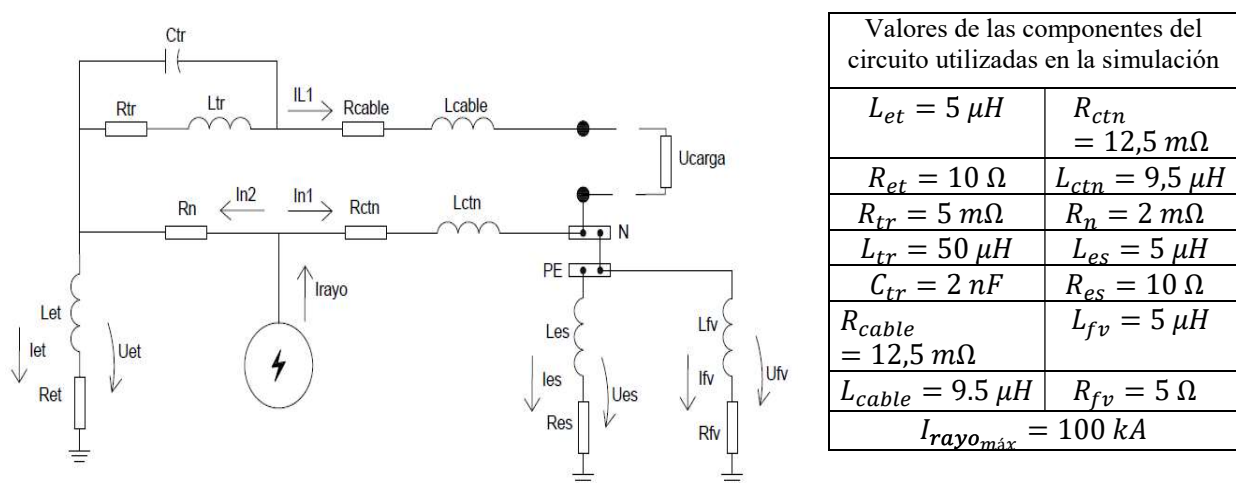


Fig. 8. Circuito equivalente. Fuente: elaboración propia

Aplicando las leyes de Kirchoff al circuito equivalente anterior, es posible obtener los valores de tensiones y corriente que circulan por la vivienda a partir de considerar diferentes niveles de puesta a tierra en la entrada del circuito eléctrico de la misma, a través de un esquema que simule dichas condiciones de trabajo, el cual se muestra en la figura 9. Considerando una resistencia de puesta a tierra del SSFV (R_{fv}) de 5 ohm, y una de 10 ohm para la vivienda (R_{es}), y una resistencia de puesta a tierra del centro de transformación (R_{et}) de 10 ohm, se obtienen los gráficos de tensiones y corrientes, que se aplica y circulan por la vivienda, y que se muestran en la figura 10. Como se observa en la figura 10, aun cuando los valores de resistencia de puesta a tierra del SSFV y de la vivienda son diferentes, las tensiones que se aplican sobre ambas componentes (U_{fv} y U_{es} , respectivamente) son las mismas, lo cual se justifica por la equipotencialidad impuesta en el esquema, mientras que las corrientes si son diferentes. Sin embargo, al variar las magnitudes de las resistencias de puesta a tierra del consumidor y el SSFV entre 2 y 30 Ω cada uno, se obtienen los resultados que se muestran en la tabla 1.

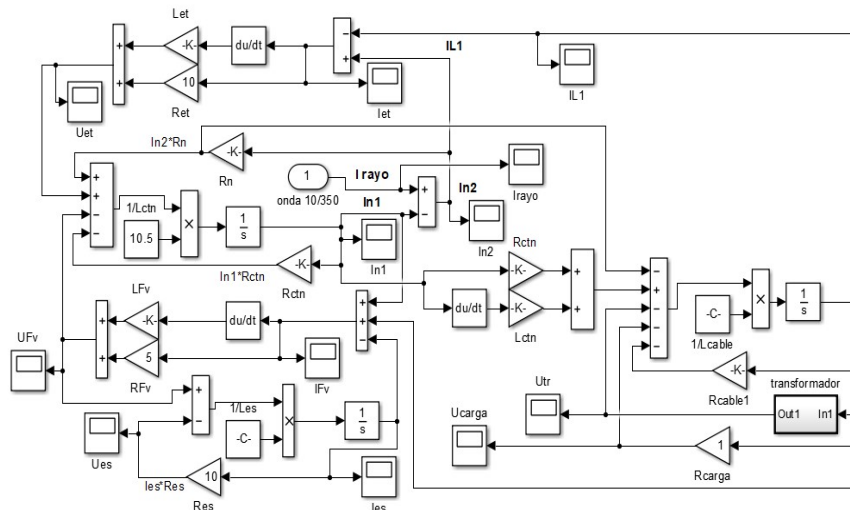


Fig. 9. Esquema en Simulink para el caso en que una DEA induce una corriente en el neutro que va desde el transformador hasta el consumidor de un sistema TN-C-S. Fuente: bloques de Simulink

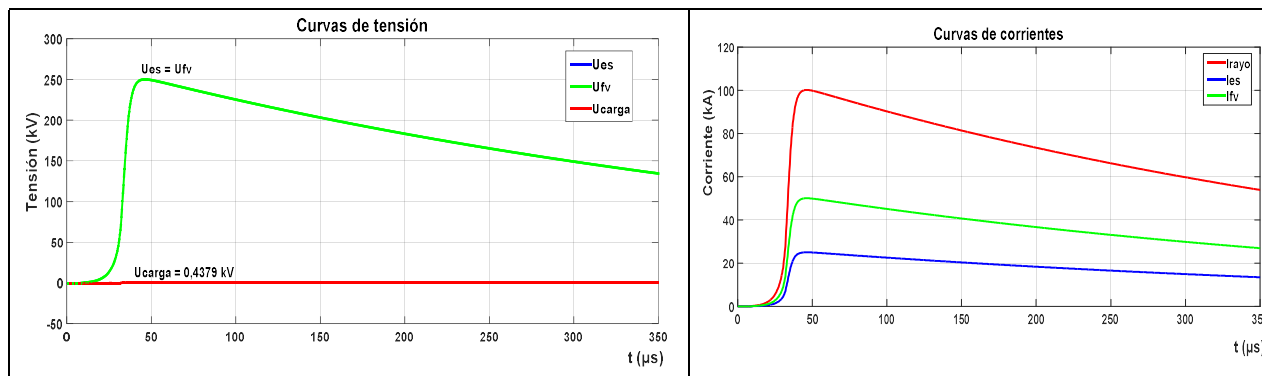


Fig. 10. Tensiones y corrientes en el circuito eléctrico de la vivienda, al inducirse una onda en el sistema por una DEA. Fuente: elaboración propia, corrida en Simulink

Tabla 1. Valores de tensión (en kV) en la carga para diferentes valores de puesta a tierra en la carga y el SSFV. Fuente: elaboración propia

		Valores de resistencia de puesta a tierra en el SSFV						
		2	5	10	15	20	25	30
Valores de resistencia de puesta a tierra en el consumidor	2	0,5516	0,5273	0,5145	0,5094	0,5066	0,5049	0,5037
	5	0,5273	0,4737	0,4379	0,4217	0,4124	0,4064	0,4022
	10	0,5145	0,4379	0,3783	0,3486	0,3307	0,3188	0,3102
	15	0,5094	0,4217	0,3486	0,3102	0,2867	0,2707	0,2591
	20	0,5066	0,4124	0,3307	0,2867	0,2591	0,2403	0,2266
	25	0,5049	0,4064	0,3188	0,2707	0,2403	0,2194	0,2041
	30	0,5038	0,4022	0,3102	0,2591	0,2266	0,2041	0,1876

Si se analiza esta variación, de la misma se puede deducir que, ante el impacto de una DEA en el sistema o cercana al mismo, el cual induce una corriente en el neutro del transformador, la tensión en la carga va a depender no solo de la resistencia de puesta a tierra de consumidor sino también de la resistencia de puesta a tierra del transformador y del SSFV y, en particular, de la relación que entre todas poseen, puesto que si la resistencia equivalente entre la puesta a tierra del consumidor y el SSFV es inferior a la del transformador, pueden provocarse tensiones muy altas en la carga. De tal forma, es evidente que se debe llegar a un compromiso en el cual se garantice que la corriente que puede circular en el circuito interno sea menor y cause el mínimo daño en los equipos internos más sensibles. Esa condición se cumple cuando la resistencia de puesta a tierra del transformador es menor que la equivalente de la resistencia de puesta a tierra de la instalación y el SSFV.

b. Caso 2. Inducción, en una de las fases de la instalación, de la corriente asociada a una DEA

Para este caso, el circuito eléctrico a analizar es el mostrado en la figura 11a, el cual lleva a un esquema de simulación como el mosrrado en la figura 11b.

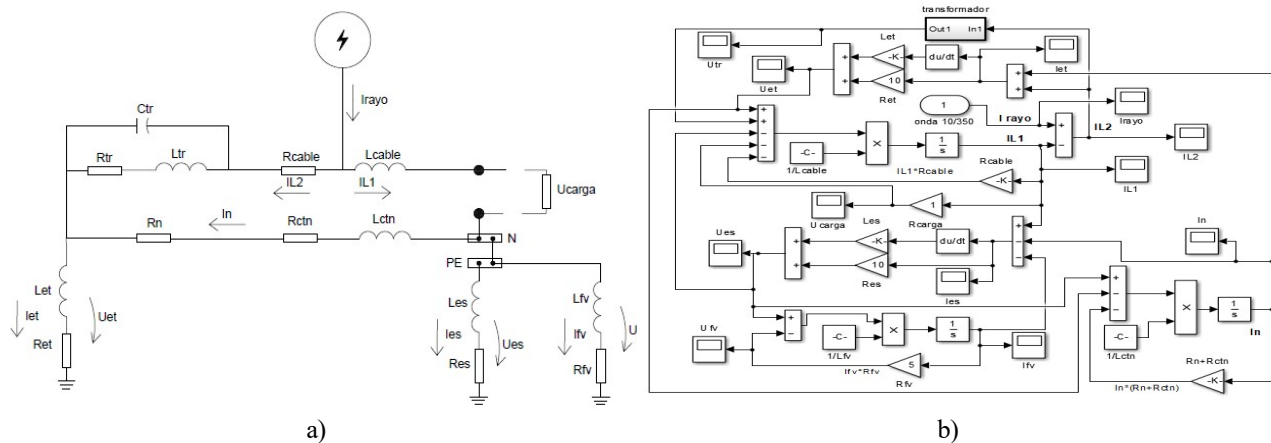


Fig. 11. Circuito eléctrico y esquema en simulink para el análisis de circulación de una onda de DEA inducida en una de las fases que alimenta una vivienda. Fuente: elaboración propia

Los resultados obtenidos, en cuanto a la tensión aplicada en la carga, al circular la corriente de la DEA inducida en la fase que alimenta la misma, se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Valores de tensión (en kV) en la carga para diferentes valores de puesta a tierra en la carga y el SSFV. Fuente: elaboración propia

		Valores de resistencia de puesta a tierra en el SFV						
		2	5	10	15	20	25	30
Valores de resistencia de puesta a tierra en el consumidor	2	1,2161	1,1667	1,1410	1,1306	1,1251	1,1216	1,1192
	5	1,1668	1,0583	0,9860	0,9531	0,9344	0,9222	0,9137
	10	1,1410	0,9860	0,8655	0,8052	0,7690	0,7449	0,7276
	15	1,1306	0,9531	0,8052	0,7276	0,6799	0,6476	0,6243
	20	1,1251	0,9343	0,7690	0,6799	0,6243	0,5862	0,5585
	25	1,1216	0,9222	0,7449	0,6476	0,5862	0,5438	0,5129
	30	1,1192	0,9137	0,7276	0,6243	0,5585	0,5129	0,4795

Como es factible observar, las tensiones que se aplican a la carga serían, en este caso, superiores a las obtenidas en el caso anterior (inducción en el neutro del sistema), por lo que debe ser considerada como la condición peor de las analizadas hasta este instante.

c. Caso 3. Inducción, en el neutro de la instalación, de corriente proveniente de una DEA, pero considerando que el neutro se abre (desconecta)

Para este caso, el circuito eléctrico a analizar es el mostrado en la figura 12a, el cual lleva a un esquema de simulación como el mostrado en la figura 12b, mientras que en la figura 13, se muestra el valor que alcanza la sobretensión en la carga bajo esta condición de trabajo, lo cual implicaría la rotura total del cableado y equipos de la vivienda pudiendo, incluso, ocasionar incendios en la misma.

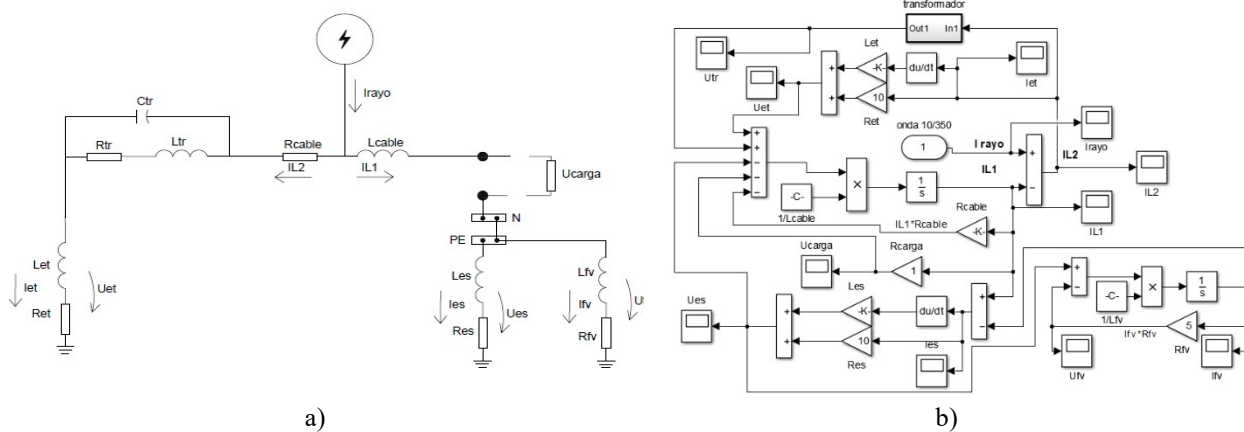


Fig. 12. Circuito eléctrico y esquema en simulink para el análisis de circulación de una onda de DEA inducida en una de las fases que alimenta una vivienda, pero con el neutro desconectado. Fuente: elaboración propia

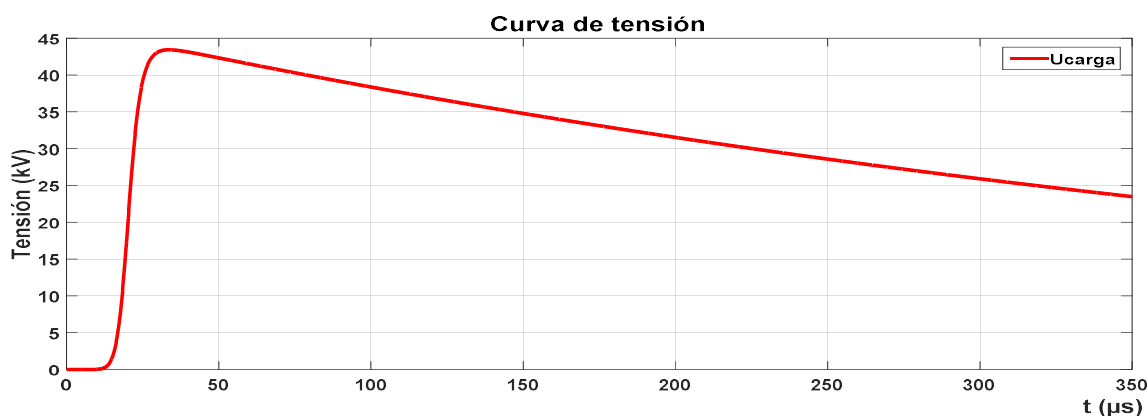


Fig. 13. Sobretensión obtenida (43 kV) en la carga al inducirse una corriente por una de las fases de alimentación de la vivienda y rompere (desconectarse) el neutro del sistema. Fuente: elaboración propia

d. Caso 4. Inducción, en la fase de la instalación, de corriente proveniente de una DEA, pero considerando que se abre (desconecta) la conexión equipotencial

El circuito eléctrico a analizar, en esta variante, es el mostrado en la figura 14a, el cual lleva a un esquema de simulación como el mostrado en la figura 14b, mientras que en la figura 15a, se muestra el valor que alcanza la sobretensión en la carga y en la figura 15b, la corriente por la misma; ambos valores son mayores a los vistos en los casos anteriores, independientemente de los valores que tomen las puestas a tierra en el SSFV y en la vivienda, por lo que es el peor caso. Es bueno aclarar que en todos los casos la sobretensión aplicada en los terminales del SSFV la carga sería la misma para cualquiera de los casos analizados al estar en paralelo ambos esquemas.

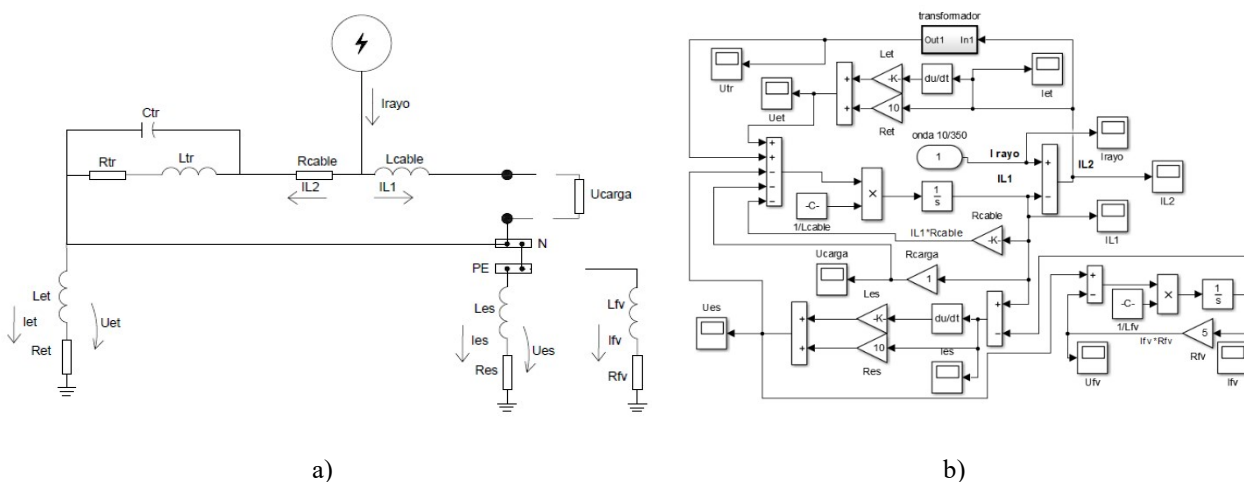


Fig. 14. Circuito eléctrico y esquema en Simulink para el análisis de circulación de una onda de DEA inducida en una de las fases que alimenta una vivienda, pero con el conductor equipotencial desconectado. Fuente: elaboración propia

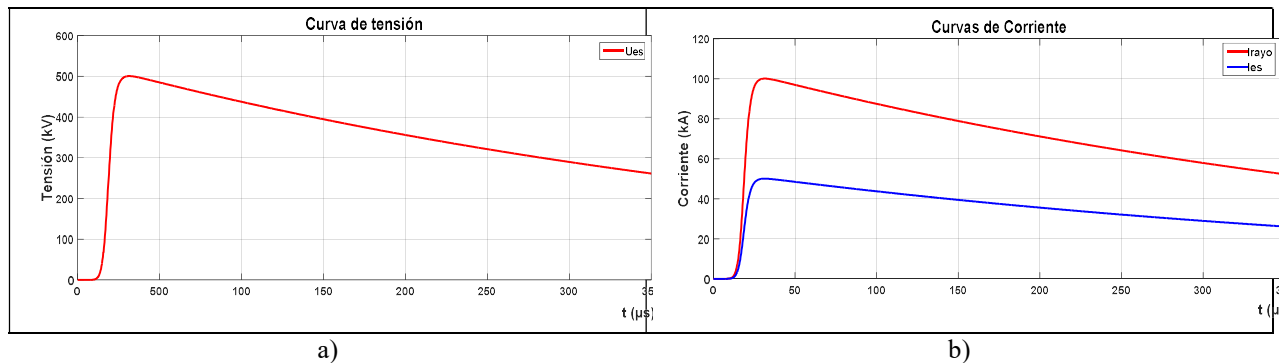


Fig. 15. Sobretensión (500 kV) y corriente (100 kA) obtenidas en la carga al inducirse una corriente por una de las fases de alimentación de la vivienda y romperse (desconectarse) el conductor equipotencial, considerando el valor de la puesta a tierra de la vivienda igual o inferior al del centro de transformación. Fuente: elaboración propia

CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos, es factible concluir que la puesta a tierra del consumidor debe tener un valor mayor a la del centro de transformación, para mantener valores de sobretensión en la carga lo más bajos posibles. Dado que la práctica internacional indica que la puesta a tierra del SSFV debe ser del orden de los 5ohm o menor, es mucho más importante, entonces, lograr que la tierra de la vivienda sea mayor que la del centro de transformación, para evitar que la resistencia equivalente de la vivienda no permita que los niveles de sobretensión, ante una corriente por DES inducida alcance valores más elevados.

La desconexión del neutro o del conductor equipotencial, ante la necesidad de tener una puesta a tierra en la vivienda, como requerimientos del SSFV, es algo que implicaría niveles de sobretensión y/o corriente, respectivamente, muy elevados, dañinos para el equipamiento existente en la vivienda y para las personas que la habitan, por lo que se requiere, obligatoriamente, una protección diferencial en el esquema que asegure que no se presente un potencial de toque mayor al normado en esos instantes. Independientemente de lo anterior, en todos los casos se sugiere el uso de dispositivos de protección contra DEA en cualquiera de sus variantes, con el objetivo de tener una protección mas adecuada a las condiciones existentes en Cuba [Betterman O. (2020). Sistemas de protección contra rayo y sobretensiones. Editores SRL. IngenieríaEléctrica 352, IEC 61643-11 (2011), UNE-EN 61643-31. (2021)].

REFERENCIAS

- [1] Zhang, Y., *et al.* “Effective Grounding of the Photovoltaic Power Plant Protected by Lightning Rods”. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2021, vol. 63, n. 4, p. 1128–1136. doi:10.1109/temc.2021.3050179. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/348828302_Effective_Grounding_of_the_Photovoltaic_Power_Plant_Protected_by_Lightning_Rods
- [2] Y. Zhang, *et al.* “Lightning protection design of solar photovoltaic systems: Methodology and guidelines,” *Elect. Power Syst. Res.*, 2019, vol. 174, e105877. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378779619301968>
- [3] I. Naxakis, *et al.* “Examining the operation of the grounding system of a PV installation,” in *Proc. IEEE Int. Conf. High Voltage Eng. Appl.*, 2018, p. 1–4. DOI: 10.1109/ICHVE.2018.8641855. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/331626051_Examining_the_operation_of_the_grounding_system_of_a_PV_installation
- [4] NFPA 780. “Standard for the Installation of Lightning Protection Systems”, Nat. Fire Protection Assoc., Quincy, MA, USA, 2020. Disponible en: <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=780>
- [5] IEEE. “Guide for Safety in AC Substation Grounding”, IEEE Std. 80-2000, 2000. Disponible en: <https://www.powerandcables.com/wp-content/uploads/2017/12/IEEE-Guide-for-Safety-In-AC-Substation-Earthing-Grounding.pdf>
- [6] Jia, K., *et al.* “Fault characteristics analysis and line protection design within a large-scale photovoltaic power plant”. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, vol. 9, n. 5, p. 4099-4108. ISSN: 1949-3061. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7807355>
- [7] Kálecz, G., *et al.* “Theory behind the zone concept for external lightning protection of photovoltaic power plants”. *Electric Power Systems Research*, 2022, vol. 209, e108025. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779622002516>

- [8] J. Birkl and E. Shulzhenko. “Investigation of lightning current distribution in a large-scale earthing system of photovoltaic power plant”. in Proc. 34th Int. Conf. Lightning Protection, 2018, p. 1–7. Disponible en: <https://www.semanticscholar.org/paper/Investigation-of-Lightning-Current-Distribution-in-Birkl-Shulzhenko/454aa38991ddb5bed7a88a093de33aebdbec4809>
- [9] P. H. Pretorius. “Loss of equipotential during lightning ground potential rise on large earthing systems”. in Proc. IEEE Int. Symp. Electro-magn. Compat., IEEE Asia-Pacific Symp. Electromagn. Compat., 2018, p. 793–797. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8393890>
- [10] Z. Tóth, I. Kiss, B. Németh. “Relation between the material of roof and the risk of lightning caused damage: the rolling sphere method in the use”. Electric Power Systems Research. 2021, vol. 196, e107286. DOI: 10.1016/j.epsr.2021.107286. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779621002674>

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Miguel Castro Fernández: <https://orcid.org/0000-0002-3983-469X>

Diseño de la investigación. Planteó el problema y la metodología para analizarlo. Participó en el análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.

Miriam Vilaragut Llanes: <https://orcid.org/0000-0002-5453-1136>

Evaluó los esquemas para ejecutar las simulaciones y la validez de las mismas. Participó en el análisis de los resultados, revisión de la escritura del artículo y en la aprobación final.

Yoandris Grandal Benitez: <https://orcid.org/0009-0007-1176-0151>

Realizó las simulaciones y el análisis de los resultados. Participó en la revisión de la escritura del artículo y en la aprobación final.

Yiancarlos Rodríguez González: <https://orcid.org/0009-0007-2121-9799>

Realizó las simulaciones y el análisis de los resultados; participó en la revisión la escritura del artículo y en la aprobación final.