



Departamento de Electroenergética

TRABAJO DE DIPLOMA

Protección contra descargas atmosféricas en el Parque
Fotovoltaico UCLV

Autor: Yuri José Militão

Tutor: Ing. Victor Rolando Jara González

MSc. Alberto Andrés Limonte Ruiz

Santa Clara, julio 2018

Copyright©UCLV

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

Atribución- No Comercial- Compartir Igual



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830
Teléfonos.: +53 01 42281503-1419

PENSAMIENTO

"Todos tenemos subidas y bajadas, lo que te define es la manera como lidias con ellas. A veces cuando se cierra una puerta debes buscar una entrada trasera; nunca dé por sentado de que hay un mañana".

Anónimo

DEDICATORIA

A mí gran familia

AGRADECIMIENTOS

A mi Dios cuyo nombre es Jehová, el que me ha dado tanto el querer como el actuar especialmente en los momentos más críticos de la carrera.

A mis Padres que son la razón de mí existir

A mi familia cubana Gabriel, Liusmila, Maura, Nilda, Eliervis, Elizabeth que sufrieron conmigo para la concepción de este proyecto.

A mis amigos Lore, Januario, Deodeth, Dedaldina, Capassola, por su apoyo.

A todos mis compañeros de clase particularmente a Edna, Sergio y Arnaldo que fuera en las buenas como en las malas siempre estuvieron allí.

A mi tutor Víctor Jara por ser incansable y transmitir el optimismo que muchas veces me faltaba.

A todos mis profesores sin excepción, por la maestría con la que me han llevado de la mano.

A todo aquel que de una u otra forma ha contribuido para que se hiciera realidad este proyecto.

A todos muchas gracias

RESUMEN

Las fuentes de energía renovables son vitales para el desarrollo sostenible de un país; en el caso de Cuba, la más explotada es la solar-fotovoltaica, influenciada especialmente por las condiciones climatológicas y geográficas del territorio. Como toda instalación eléctrica, los parques fotovoltaicos también necesitan las protecciones correspondientes, con el objetivo especial de salvaguardar la vida del personal y aumentar el tiempo de vida útil de los medios técnicos empleados, los cuales son muy costosos y sensibles. En este trabajo se hace referencia a la protección contra descargas atmosféricas, capaz de garantizar la correcta operación de la instalación ante las eventualidades características y que, por consiguiente, requieren de un ajuste y diseño lo más certero posible. La revisión del “Proyecto Parque Fotovoltaico UCLV”, demuestra que existen ciertas anomalías en el diseño de la protección contra descargas atmosféricas, lo cual lleva a considerar ciertas mejoras en este sentido, haciendo uso de software profesionales que emplean métodos matemáticos validados y garantizan a su vez, un correcto diseño óptimo.

TABLA DE CONTENIDOS

PENSAMIENTO	i
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
RESUMEN.....	iv
INTRODUCCIÓN	1
Organización del informe.....	4
CAPÍTULO I. CONSIDERACIONES TEÓRICAS SOBRE PARQUES FOTOVOLTAICOS Y SU SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	5
1.1 Parques fotovoltaicos.....	6
1.2 Descargas atmosféricas	6
1.2.1 Descripción del fenómeno “rayo”	7
1.2.2 Principales efectos de los rayos sobre instalaciones fotovoltaicas	7
1.2.3 Principales métodos de protección contra descargas atmosféricas	8
1.3 Sistema de puesta a tierra en una instalación fotovoltaica	13
1.3.1 Objetivos de los sistemas de puesta a tierra.....	13
1.3.2 Clasificación de los sistemas de puesta a tierra	14
1.3.3 Requisitos de un sistema de puesta a tierra	15
1.3.4 Factores que pueden incidir en el proyecto de una puesta a tierra.....	16
1.4 Conclusiones del capítulo	19
CAPITULO 2. PROYECTO DE MONTAJE Y PROTECCIÓN DEL PARQUE FOTOVOLTAICO UCLV 20	
2.1 Proyecto Parque Fotovoltaiico UCLV	20
2.1.1 Ubicación y características generales.....	21
2.1.2 Malla de puesta a tierra	22
2.1.3 Conexión de la subestación a la malla de tierra	24

2.1.4 Los pozos de tierra	24
2.1.5 Equipotencialización en el sistema.....	25
2.1.6 Puesta a tierra de las cercas	28
2.1.7 Puesta a tierra de la red de datos	29
2.2 Análisis del sistema de protección contra impactos directos de descargas atmosféricas sobre la instalación.....	30
2.3 Resumen de la consulta al proyecto de diseño.....	33
2.4 Conclusiones del capítulo	34
CAPÍTULO3. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y PROPUESTA DE SOLUCIONES	35
3.1 Software para el cálculo de protecciones contra descargas atmosféricas	35
3.1.1 Software Lightning Solutions.....	35
3.1.2 Software FotoProt.....	37
3.1.3 Software PAST	39
3.2 Chequeo de la resistencia de puesta a tierra (RPT).....	41
3.3 Chequeo de la protección contra descargas atmosféricas	44
3.3.1 Mástiles ubicados en las luminarias.....	44
3.3.2 Mástiles encima de la caseta de inversores.....	45
3.3.3 Mástiles instalados en la Facultad de Ingeniería Eléctrica	46
3.4 Protección óptima contra descargas atmosféricas	49
3.5 Conclusiones del capítulo	52
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	53
Conclusiones.....	53
Recomendaciones	54
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

INTRODUCCIÓN

El desarrollo actual de la sociedad está estrechamente ligado a la disponibilidad energética de la misma, siendo la energía eléctrica uno de los principales recursos en el proceso de desarrollo y tecnificación, que influye directamente en el aumento de la calidad de vida del hombre y del incremento de la industrialización. Hoy en día se dedican grandes esfuerzos para que las fuentes energéticas sean del tipo renovables y limpias, siendo mediante su aplicación y desarrollo, un freno a los problemas del calentamiento global generado como consecuencia de la contaminación ambiental por los gases de efecto invernadero, los cuales son generados mediante la quema de combustibles fósiles. El sol es la mayor fuente de energía renovable, la cantidad de energía solar recibida anualmente es tan grande que equivale aproximadamente al doble de toda la energía producida jamás por otras fuentes de energía no renovable como son el petróleo, el carbón, el uranio y el gas natural. Los paneles fotovoltaicos son capaces de convertir esa energía solar en energía eléctrica basado en el efecto fotoeléctrico. Los parques fotovoltaicos son capaces de generar electricidad durante el día, conectados a la red de distribución de una zona o país, entregando una energía limpia y sin provocar contaminación al medio ambiente.

Las primeras experiencias en Cuba sobre la integración de la energía solar, han estado unidas a proyectos de electrificación rural. Desde finales de los años 80 y principios de los 90 se comenzó a desarrollar un programa de electrificación en estas áreas, generalmente intrincadas y montañosas, con el objetivo de llevar la electricidad a todas las regiones de la isla mejorando la calidad de vida de sus habitantes; sobre todo, se extendieron las instalaciones en escuelas y centros de salud. Se han dado pasos firmes hacia la independencia energética, demostrados mediante la implementación de iniciativas las cuales son una apuesta hacia el futuro de la isla, siendo capaces de contrarrestar los problemas existentes en cuanto al abastecimiento del petróleo y el perjuicio que esto supone para la economía del país. En el año 2012, Cuba poseía en su matriz energética un 4 %

de energía renovable, con expectativas actuales de cubrir con estas fuentes de energía el 10% de la misma para el año 2020.[1]

Teniendo en cuenta la afirmación anterior, referente al desarrollo de la matriz energética de la isla, y siendo eficientes en el aprovechamiento de excelentes recursos en materia de energía solar que posee la misma, se realizan importantes inversiones en el marco de incrementar la generación eléctrica a partir de parques fotovoltaicos; en pleno año 2018, como parte del desarrollo de esta política, se continúa llevando a cabo el “Programa Nacional de Desarrollo de las Fuentes Nacionales de Energía”, aprobado en junio de 1993 y el “Programa Nacional de Ciencia y Técnica: Desarrollo Energético Sostenible”, del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (CITMA).[1]

La conexión de los parques fotovoltaicos en el Sistema Electroenergético Nacional (SEN), trae consigo la necesidad de realizar un análisis más detallado de las consecuencias que podría traer dicha conexión para el funcionamiento óptimo del parque; por ejemplo, cuando existen sobretensiones por el lado de corriente alterna, tanto por operaciones en el sistema como por descargas atmosféricas.

Como **objeto de estudio** en este trabajo se toma al “Parque Fotovoltaico UCLV”, el cual será inaugurado en fecha próxima después de realizarle las últimas comprobaciones técnicas. Dicho parque no está exento de las situaciones que anteriormente se exponían, por lo que resulta conveniente verificar las propuestas de las protecciones correspondientes, mediante software profesionales validados.

Según los antecedentes expuestos en el párrafo anterior, y en vista a aplicar las medidas que sean necesarias para llegar a la mejor solución, se propone el siguiente **problema científico**:

¿Cómo proteger de forma óptima el Parque Fotovoltaico UCLV contra descargas atmosféricas mediante el empleo de software profesionales?

En concordancia con lo planteado en el problema científico y enfocando este trabajo en dar solución al mismo, se establece como **objetivo general** de la investigación: Proponer un sistema idóneo de protección contra descargas atmosféricas en el Parque Fotovoltaico UCLV empleando softwares profesionales validados.

Derivándose de este, los siguientes **objetivos específicos**:

1. Fundamentar teóricamente lo referente a las descargas atmosféricas como fenómeno natural y su influencia particular en el territorio de Villa Clara.
2. Profundizar en los métodos utilizados para el cálculo de protecciones contra descargas atmosféricas, especialmente aplicados a parques fotovoltaicos.
3. Evaluar el Proyecto Parque Fotovoltaico UCLV en lo concerniente a su sistema de puesta a tierra y a las protecciones contra descargas atmosféricas empleadas.
4. Chequear el sistema de puesta a tierra construido en el parque a partir de mediciones reales.
5. Determinar el sistema óptimo de protección contra descargas atmosféricas mediante el uso de software profesionales.

Como **tareas técnicas** en el proceso de realización del trabajo se consideran:

1. Fundamentación sobre las descargas eléctricas como fenómenos naturales y su influencia actual en la provincia de Villa Clara.
2. Análisis exhaustivo de métodos utilizados para el cálculo de protecciones contra descargas atmosféricas, particularmente, teniendo en cuenta su implementación en parques fotovoltaicos.
3. Evaluación del Proyecto Parque Fotovoltaico UCLV en lo concerniente a su sistema de puesta a tierra y a las protecciones contra descargas atmosféricas empleadas.
4. Chequeo del sistema de puesta a tierra construido en el parque a partir de mediciones reales.
5. Determinación del sistema óptimo de protección contra descargas atmosféricas mediante el uso de software profesionales.

Organización del informe

El presente trabajo está estructurado de la siguiente manera:

Primer Capítulo: Consideraciones teóricas sobre parques fotovoltaicos y su sistema de protección contra descargas atmosféricas.

Se enuncian consideraciones referentes a la construcción, desarrollo y explotación de parques fotovoltaicos; los efectos de las descargas atmosféricas que pueden incidir sobre los mismos, además, se abordan conceptos fundamentales sobre los sistemas de puesta a tierra como complemento a las protecciones en estudio. Se realiza un estudio crítico acerca de la situación climatológica actual en el territorio de Villa Clara.

Segundo Capítulo: Proyecto de montaje y protección del Parque Fotovoltaico UCLV.

Se realiza un análisis detallado del “Proyecto Parque Fotovoltaico UCLV”, del cual se extraen datos de interés para las futuras evaluaciones técnicas en el ámbito de protección contra descargas atmosféricas. Se utiliza el software PAST para modelar el correspondiente sistema de puesta a tierra establecido en el proyecto y posteriormente usar los resultados obtenidos en comparaciones pertinentes.

Tercer Capítulo: Análisis de resultados y propuesta de soluciones.

Se realiza el cálculo del sistema idóneo de protección contra descargas atmosféricas en el Parque Fotovoltaico UCLV, mediante la aplicación de metodología tradicional de cálculo validada en la bibliografía consultada y mediante el apoyo del software profesionales diseñados con este fin especial. Se establece una comparación de resultados obtenidos en el trabajo con los propuestos en el proyecto original de diseño lo cual tributa posteriormente a las correspondientes conclusiones.

CAPÍTULO I. CONSIDERACIONES TEÓRICAS SOBRE PARQUES FOTOVOLTAICOS Y SU SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

La situación climatológica actual en el territorio de Villa Clara según estadísticas del Instituto de Meteorología, hace necesaria la realización de estudios de protección contra descargas atmosféricas en instalaciones eléctricas de alto impacto en el desarrollo económico-social de la nación, debido al considerable número de tormentas al año y de poseer dicho territorio una alta tasa de muertes por fulguración. En el Servicio Provincial de Medicina Legal de Villa Clara, se realizó un estudio descriptivo, longitudinal, retrospectivo, de los fallecidos por fulguración entre el 1ro de enero de 2009 y el 31 de diciembre de 2014, para determinar sexo, edad y ocupación de los afectados, zona y época del año de mayor ocurrencia, así como las lesiones externas más frecuentes. En el libro de registro y las actas de necropsias, se encontraron 16 fallecidos por esta causa. Predominó el sexo masculino, en la edad laboral; septiembre, mayo y junio fueron los meses de mayor incidencia. Todos los hechos ocurrieron en la zona rural, y el 62,5 %, a la intemperie. La zona noroeste de la provincia resultó la más afectada y las lesiones más frecuentes fueron las quemaduras. Aunque el número de fulguraciones no parece alto, es el fenómeno natural que provoca más muertes en Cuba. La construcción y explotación de parques fotovoltaicos constituye una tarea priorizada dentro del modelo de desarrollo energético del país, los cuales se ven afectados por impactos directos de rayos y de contingencias propias del sistema al que se conectan. En este capítulo se fundamenta la temática expuesta desde el punto de vista actual y se toman en cuenta consideraciones importantes a la hora de hacer estudios de protección en este tipo de instalaciones.[2]

CAPÍTULO I. CONSIDERACIONES TEÓRICAS SOBRE PARQUES FOTOVOLTAICOS Y SU SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

1.1 Parques fotovoltaicos

La conexión de varios módulos de paneles solares nos permite construir lo que hoy en día se conoce por instalaciones solares fotovoltaicas (o parques fotovoltaicos) que, en dependencia del tamaño total en su agrupación, generarán diferentes potencias. Un sistema fotovoltaico es el conjunto de elementos que permite suministrar energía eléctrica para cubrir las necesidades planteadas a partir de la energía procedente del sol.[3]

Las instalaciones fotovoltaicas se encuentran de forma aislada para alimentar una carga determinada o conectadas al suministro eléctrico de un país (SEN) o zona. Aun con distinta disponibilidad no tienen muchas diferencias en cuanto a las partes fundamentales correspondientes. La instalación de tipo conectada a red está compuesta principalmente por:

- Sistema de captación energética: igual que en las instalaciones aisladas, los elementos encargados de captar la energía son los módulos fotovoltaicos que transforman la radiación solar en energía eléctrica.
- Sistema de adaptación de corriente: formado por un sistema de conmutación electrónico, llamado inversor, que transforma la corriente continua que generan los módulos fotovoltaicos en corriente alterna.
- Sistema de evacuación de la energía: encargado de evacuar la energía transformada por el inversor a la red eléctrica. Está formado por un centro de transformación que eleva la tensión que recibe del inversor, a la tensión que se inyecta en la red eléctrica; depende del punto de conexión.[3]

En dependencia de la complejidad de las instalaciones podría tener otros componentes, pero lo esencial para el funcionamiento de estos centros de generación son los mencionados anteriormente.

1.2 Descargas atmosféricas

El rayo es la unión violenta de las cargas positivas y negativas, que constituye una descarga eléctrica a través de gases de baja conductividad. Las descargas

CAPÍTULO I. CONSIDERACIONES TEÓRICAS SOBRE PARQUES FOTOVOLTAICOS Y SU SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

pueden ocurrir de nube a nube o de nube a tierra; usualmente las nubes están cargadas negativamente en su base y positivamente en su parte superior. Por inducción electrostática la tierra resultará positiva inmediatamente debajo de tal nube, se establece así una diferencia de potencial enorme, produciéndose el rayo cuando se vence la rigidez dieléctrica del medio (aire o vapor de agua). Simultáneamente con el rayo se produce la luz (relámpago) y sonido (trueno).[4]

1.2.1 Descripción del fenómeno “rayo”

Aproximadamente la mitad de los rayos constituyen descargas simples y la otra mitad corresponde a rayos compuestos por descargas múltiples de rápida sucesión. Así como en la nube se forman centros de carga, algo similar ocurre en la tierra, pues hay suelos más conductores que otros, teniéndose en cuenta que las cargas en la tierra se mueven según la inducción que impone la nube. Dado que la nube puede cubrir grandes superficies terrestres, su influencia electrostática será importante; puede haber de este modo muchos centros de carga. El rayo incidirá sobre el elemento que le signifique mayor conductividad y sea capaz de aportar más cargas al fenómeno. También pueden producirse descargas superficiales entre ellos al desaparecer la carga inductora como consecuencia de rayos de nube a nube. El inicio de la descarga en una primera instancia es invisible, en la cual varios pilotos se acercan a tierra, a modo de ramificaciones. Cuando el camino trazado por los pilotos queda ionizado, se inicia la descarga de retorno principal, las que originan descargas visibles.[4]

1.2.2 Principales efectos de los rayos sobre instalaciones fotovoltaicas

Las descargas atmosféricas tienen su mayor influencia en las instalaciones sobre estructuras (incluso cuando la altura de las mismas no es relativamente considerable), trayendo consigo los siguientes efectos con desenlace negativo:[5]

- Efectos térmicos: fusión en los puntos de impacto del rayo y efecto Joule, debido a la circulación de la corriente, lo que puede producir incendios.

CAPÍTULO I. CONSIDERACIONES TEÓRICAS SOBRE PARQUES FOTOVOLTAICOS Y SU SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

- Efectos electrodinámicos: cuando las corrientes de los rayos circulan por conductores paralelos, provocan fuerzas de atracción o repulsión entre los cables, lo que produce roturas o deformaciones mecánicas.
- Efectos de choque: los rayos pueden producir que el aire se expanda y se cree una sobrepresión que se dispersa en una distancia de varias decenas de metros. Un efecto de explosión rompe ventanas o divisiones que pueden proyectarse en animales o personas a varios metros de su posición original. Esta onda de choque al mismo tiempo se convierte en una onda de sonido (trueno).
- Sobretensiones por conducción tras un impacto en las líneas telefónicas o en las líneas eléctricas aéreas.
- Sobretensiones inducidas por el efecto de radiación electromagnética del canal del rayo que actúa como antena en varios kilómetros.
- El aumento del potencial de tierra por la circulación de la corriente del rayo en dicha tierra.[6]

Los efectos eléctricos se traducen en sobretensiones y “efectos de contorno” (condición previa a la ruptura del arco eléctrico), los cuales se evidencian de dos formas:

- Efecto de contorno entre un conductor y una masa metálica adyacente.
- Efecto de contorno entre una masa metálica a diferentes potenciales debido a la elevación del gradiente de potencial de tierra.

Cualquiera de estos efectos mencionados anteriormente, son causantes de grandes daños en instalaciones fotovoltaicas y principalmente ponen en peligro la vida de las personas que la operan.

1.2.3 Principales métodos de protección contra descargas atmosféricas

Los inicios de la protección contra rayos, datan de 1760, cuando Benjamín Franklin (1706 – 1790) expuso el principio del pararrayos que hoy lleva su nombre. El pararrayos de Franklin, o punta Franklin consiste en una barra conductora

CAPÍTULO I. CONSIDERACIONES TEÓRICAS SOBRE PARQUES FOTOVOLTAICOS Y SU SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

vertical, terminada en punta y conectada a una toma de tierra mediante un conductor apropiado.[7, 8]

La operación del pararrayos se basa en el efecto de punta, que establece que el campo eléctrico de una superficie cargada aumenta en la medida en que se reduce su radio de curvatura. Una punta puede considerarse una superficie cuyo radio tiende a cero, por lo que el campo eléctrico de la misma es muy elevado, así como la presión electrostática producida por este, lo que hace fluir las cargas por la punta y facilita la creación del trazador ascendente. De esta manera, el trazador emitido por la punta Franklin compite satisfactoriamente con los trazadores emitidos por otros objetos de menor altura y no terminados en punta, por lo que tiene la mayor probabilidad de recibir el impacto directo del rayo y evitar que este afecte a los objetos cercanos al pararrayo.

Método del cono de protección

Hasta los inicios del siglo XIX, los científicos carecían de un conocimiento avanzado de electromagnetismo. El desarrollo alcanzado en los sistemas de protección contra rayos en esta época era fruto de observaciones, pruebas y errores. No fue hasta 1823, que Gay-Lussac propuso el concepto de cono de protección de un pararrayos. En aquella ocasión se consideró que el radio de la base del cono era dos veces la altura del terminal aéreo (figura 1.1).[7, 8]

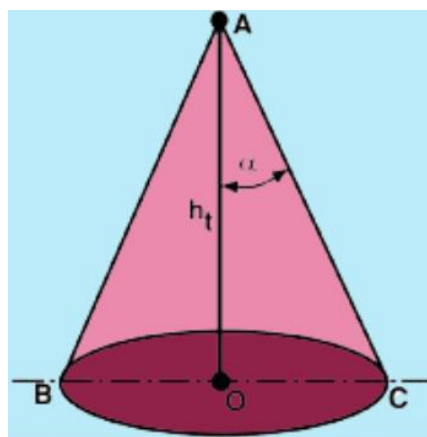


Figura 1.1. Representación del cono de protección.

CAPÍTULO I. CONSIDERACIONES TEÓRICAS SOBRE PARQUES FOTOVOLTAICOS Y SU SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

En la figura 1.1, se muestran las siguientes variables:

A-Cabeza del captor.

B-Plano de referencia.

OC-Radio del área protegida.

ht-Altura del captor sobre el plano de referencia.

alfa-Ángulo de protección.

En 1880, Preece concluyó, basado en experimentos más precisos, que el radio de la base era igual a la altura del cono (ángulo de 45°), concepción que prevaleció por muchos años, hasta que, en 1920, Peek comprobó una mayor extensión de la zona protegida hasta un ángulo de $64 - 76^\circ$. Actualmente, se considera que la zona protegida puede alcanzar los 60° con respecto a la vertical. [8]

En 1978, más de 200 años después de la invención del pararrayo, Lee publicó el *modelo electrogeométrico* de la protección contra rayos, el cual permanece en uso internacionalmente por las normas de protección contra descargas atmosféricas actuales. Dada su importancia práctica y aplicación actual como se acotaba anteriormente, se emplea dicho método en los estudios realizados en este trabajo y se dedica a su fundamentación la generalidad del presente epígrafe.

Método electrogeométrico (esferas rodantes)

El método de las esferas rodantes está basado en un modelo electrogeométrico (figura 1.2) donde se asume que el último trazador descendente del que va a impactar en la instalación a proteger tiene una forma de esfera ficticia “rodante” de radio D (espacio donde puede ubicarse el último trazador). En dicho modelo, se establecen los conceptos de *Distancia de Golpeo* y *Punto de Discriminación*. [9]

CAPÍTULO I. CONSIDERACIONES TEÓRICAS SOBRE PARQUES FOTOVOLTAICOS Y SU SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

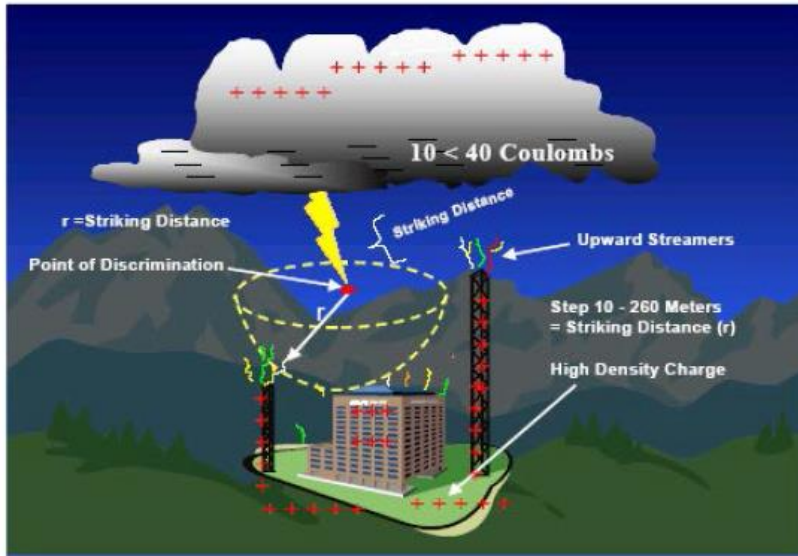


Figura 1.2. Modelo electrogeométrico. [9]

El centro de la esfera se conoce como punto de discriminación (punto de impacto); lugar donde comienza el último paso del trazador descendente.

La zona protegida por un pararrayo Franklin según este modelo, es aquella que queda por debajo de los puntos de contacto de la esfera con el pararrayo y la superficie del terreno, o sea, que no puede ser tocada por la esfera sin antes tocar el pararrayo o el suelo. En aquellos puntos que la esfera toca la estructura se deberán instalar terminales captadoras.

Con estos terminales instalados surge el concepto de radio de protección “ R_p ”, siendo la zona protegida la que se observa en la figura 1.3.

CAPÍTULO I. CONSIDERACIONES TEÓRICAS SOBRE PARQUES FOTOVOLTAICOS Y SU SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

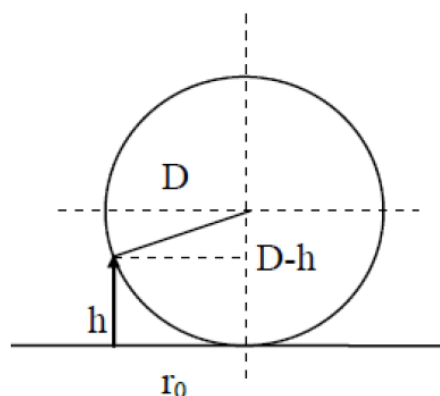


Figura 1.3. Zona protegida según la definición del radio de protección (R_p).

Según la norma [7], el radio de la esfera rodante (D) varía en función del nivel de protección según la tabla 1.1.

Tabla 1.1. Variación del radio de la esfera según el nivel de protección.

Nivel de protección	Variación del radio D (m) según el método de las esferas rodantes
I	20
II	30
III	45
IV	60

Otra forma de calcular el radio de la esfera o “distancia de golpeo D'' ”, es mediante la longitud de un paso del trazador descendente (10–200), que depende estadísticamente de la intensidad del rayo según:

$$D = 10 * I^{0.65} \quad (1)$$

Dónde:

D : radio de la esfera o distancia de golpeo en m.

I : Intensidad del rayo en kA.

CAPÍTULO I. CONSIDERACIONES TEÓRICAS SOBRE PARQUES FOTOVOLTAICOS Y SU SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Después de aplicar cualesquiera de estas vías, el radio de protección R_p o r_0 sobre el terreno, se determina mediante la igualdad:

$$D^2 = r_0^2 + (D - h)^2 \quad (2)$$

Obteniéndose como resultado:

$$r_0 = \sqrt{D^2 - (D - h)^2} = \sqrt{h(2D - h)} \quad (3)$$

Dónde:

r_0 - Radio de protección en m.

D- Radio de la esfera o distancia de golpeo en m.

h- Altura de la instalación a proteger en m.

1.3 Sistema de puesta a tierra en una instalación fotovoltaica

Como se observa, los efectos del rayo están directamente relacionados con el esquema de puesta a tierra que se tenga implementado en la instalación; el diseño de las medidas de protección debe estar en concordancia con dicho esquema previamente a la construcción de la instalación.

Se puede afirmar que un sistema de puesta a tierra es un conjunto de electrodos metálicos desnudos, enterrados en el terreno e interconectados eléctricamente entre sí, cuyo objetivo principal es proporcionar un contacto eléctrico entre la tierra física y otros elementos metálicos que se encuentran sobre una instalación, sobre el terreno o en el terreno mismo.[10]

1.3.1 Objetivos de los sistemas de puesta a tierra

Los objetivos perseguidos al implementar un sistema de puesta a tierra son múltiples y obedecen a razones y situaciones diversas. El objetivo primordial es garantizar la seguridad de las personas que laboran en la instalación. Otro objetivo es asegurar el comportamiento técnicamente adecuado del sistema eléctrico de la instalación. Ambos objetivos conjuntamente determinarán las características y su dimensionamiento.[4]

CAPÍTULO I. CONSIDERACIONES TEÓRICAS SOBRE PARQUES FOTOVOLTAICOS Y SU SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Desde el punto de vista del comportamiento técnico de un sistema eléctrico, una puesta a tierra cumple diversas funciones:

1. Contribuir a reducir los valores de sobrevoltaje que pueden aparecer en condiciones anormales de operación en los sistemas de transmisión.
2. Proporcionar una vía de baja resistencia (impedancia) para lograr la operación correcta de los elementos de protección (relés, fusibles, etc.) de las líneas de los sistemas de transmisión.
3. Conducir de forma eficiente hacia tierra las descargas atmosféricas, y limitar las diferencias de potencial que pudieran presentarse en la instalación.[10]

Cuando se cumplen correctamente estos objetivos en la construcción de un sistema de puesta a tierra se garantizan las condiciones para lograr un nivel de protección adecuado.

1.3.2 Clasificación de los sistemas de puesta a tierra

El sistema de puesta a tierra que tiene como objetivo principal reducir al mínimo los riesgos a la seguridad de las personas, y también de los equipos, se acostumbra denominarla puesta a tierra de protección. De acuerdo a esta definición, a ella se conectan conductivamente los elementos metálicos expuestos de una instalación; entiéndase por estos, aquellos elementos conductores, normalmente sin tensión (carcasas, cubículos, tuberías, crucetas de postes de líneas, etc.), pero que pueden eventualmente adquirir un potencial con respecto a puntos del terreno, o con respecto a otros objetos metálicos expuestos al producirse una falla en la instalación.[4]

Por otro lado, la puesta a tierra que tiene como objetivo prioritario el ser punto de unión de tierra de partes “activas” de un sistema de transmisión (neutros de transformadores de potencia y medición, divisores capacitivos, etc.), se denominan puesta de tierra de operación o puesta de tierra de servicio.

CAPÍTULO I. CONSIDERACIONES TEÓRICAS SOBRE PARQUES FOTOVOLTAICOS Y SU SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

1.3.3 Requisitos de un sistema de puesta a tierra

En consideración a los objetivos de un sistema de puesta a tierra, se debe requerir de estas determinadas características o requisitos, los cuales se dividen en dos categorías fundamentales: requisitos del proyecto y requisitos del diseño.[5]

Requisitos del proyecto

- El sistema de puesta a tierra deberá tener como máximo, un determinado valor de resistencia establecido.
- El sistema de puesta a tierra deberá tener como máximo, un determinado valor de impedancia a impulso establecido.
- El sistema de puesta a tierra deberá abarcar un área tal que integre todos los elementos de la instalación que puedan adquirir potenciales peligrosos al ocurrir una falla. Además, los elementos de la puesta a tierra deben estar dispuestos de manera que se cumplan con los requerimientos de seguridad para las personas que trabajan o transitan en su interior o contorno.
- Deben tenerse en cuenta los posibles riesgos que puedan presentarse para los equipos instalados en el interior y exterior de la instalación protegida, realizando las acciones necesarias para disminuir estos riesgos de daños a un mínimo. Se debe considerar aspectos de costo / beneficio.

En dependencia del caso particular, se deberá cumplir con parte o la totalidad de los requisitos de proyecto indicados.

Requisitos del diseño

- Los diferentes elementos constituyentes de la puesta a tierra deberán poder conducir las corrientes máximas que eventualmente puedan circular por ellos, durante el posible tiempo máximo sin exceder la temperatura máxima permisible. Esta temperatura depende del material de la puesta a tierra y del tipo de unión usado entre sus partes. Este requerimiento es aplicable

CAPÍTULO I. CONSIDERACIONES TEÓRICAS SOBRE PARQUES FOTOVOLTAICOS Y SU SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

tanto a los electrodos como a los elementos de unión entre ellos; los equipos y estructuras.

- Los elementos de la puesta a tierra deberán soportar sin deterioro, los esfuerzos mecánicos a que pueden quedar sometidos durante las faenas de construcción de esta u otras faenas contemporáneas.
- El material empleado en la construcción de la puesta a tierra deberá ser resistente a eventuales ataques corrosivos del terreno y atmósfera.
- No se usarán en las puestas a tierra, materiales que puedan producir corrosión galvánica de importancia en otros elementos metálicos enterrados; por ejemplo, tuberías de diferentes usos, bases de estructuras, anclajes de estructuras de líneas atirantadas, etc.
- Se deberán sobredimensionar y proteger los conductores de conexión a la puesta a tierra en aquellos casos en que un calentamiento normalmente aceptado en otras circunstancias, pudiera dar lugar a incendios debido a la presencia de materiales de fácil combustión o inflamables.
- En zonas con emanaciones gaseosas inflamables, deberá recurrirse a métodos adecuados para evitar en su casi totalidad, posibles arcos eléctricos entre partes metálicas o entre partes metálicas y el terreno.

1.3.4 Factores que pueden incidir en el proyecto de una puesta a tierra

Anteriormente fueron establecidos los requisitos habituales para efectuar un proyecto de sistemas de puesta a tierra, que está determinado en gran medida por los siguientes factores, que son propios de cada instalación en particular:[10]

- Corriente residual dispersada por la puesta a tierra.
- Tiempo de duración de la falla residual.
- Resistividad del terreno.
- Resistividad superficial del terreno.
- Dimensiones de la puesta a tierra.
- Geometría de los electrodos de la puesta a tierra.

CAPÍTULO I. CONSIDERACIONES TEÓRICAS SOBRE PARQUES FOTOVOLTAICOS Y SU SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Resistividad del terreno

La resistividad del terreno donde se construirá una puesta a tierra tiene una influencia de primer orden en el proyecto de esta. Se debe considerar que la resistividad influye proporcionalmente en las características de una puesta a tierra variando dentro de rangos muy amplios. Es necesario realizar las mediciones pertinentes para utilizar en el proyecto un valor de resistividad lo más cercano posible a la realidad.

La resistividad de un terreno es por lo general heterogénea y lo normal es que se presente en forma de estratos de diferentes minerales aproximadamente paralelos a la superficie del suelo, cada uno de ellos con una resistividad aproximadamente homogénea. [11]

Resistividad superficial del terreno

Los valores tolerables de voltaje entre pies y entre manos-pies, dependen en gran medida del valor de la resistividad de la parte superior del terreno que cubre la puesta a tierra. Esta resistividad determina la resistencia de contacto de cada pie con el terreno. Por ejemplo, si la capa superior natural tiene una resistividad de $100 \Omega\cdot\text{m}$, y no se utiliza material artificial para cubrir el área abarcada por la puesta a tierra, los valores de voltaje tolerables entre pies y entre manos-pies son 188 y 134V respectivamente, durante 1 segundo. Si se usa un material artificial de resistividad $1.000 \Omega\cdot\text{m}$ en un espesor de 0.15 m, estos valores aumentan a 610 y 239V respectivamente.

Dimensiones de una puesta a tierra

Cuando se proyecta un sistema de puesta a tierra, por ejemplo, para una subestación, complejo industrial, un parque fotovoltaico u otra instalación relacionada con el sistema de alta tensión, se plantean habitualmente dos requerimientos: un valor máximo de resistencia, que no debe sobrepasarse, y la

CAPÍTULO I. CONSIDERACIONES TEÓRICAS SOBRE PARQUES FOTOVOLTAICOS Y SU SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

condición de garantizar la seguridad de las personas y equipos (chequeando fundamentalmente los potenciales de contacto y de paso).

El valor de la resistencia de una puesta a tierra para una misma constitución del terreno, depende en gran medida de su dimensión superficial. Para los electrodos elementales: barras y conductores horizontales, las dimensiones que se tienen en cuenta son la longitud y el diámetro. Si se trata de una malla de tierra, la dimensión principal que determina mayoritariamente su resistencia es el radio equivalente, lo que influye en menor grado el tipo de conductor, la cantidad total de este, y su profundidad de enterramiento. Así, la relación de resistencias entre una puesta a tierra rectangular formada solo por conductores periféricos y una plancha metálica de iguales dimensiones, es de 1 a 0.72 aproximadamente, en un terreno homogéneo.

Geometría de una puesta a tierra

Una puesta a tierra puede tener como requisito único el poseer un determinado valor máximo de resistencia. En este caso, la solución más adecuada es utilizar un electrodo o un conjunto de electrodos, que signifiquen un costo mínimo, en consideración con materiales y faenas para la construcción de la puesta a tierra. La decisión entre diferentes opciones dependerá en gran medida de la disponibilidad del terreno, características mecánicas de este, posibilidades de utilizar métodos especiales, etc.[5]

CAPÍTULO I. CONSIDERACIONES TEÓRICAS SOBRE PARQUES FOTOVOLTAICOS Y SU SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

1.4 Conclusiones del capítulo

Para realizar un estudio acorde a requerimientos normados, es necesario el conocimiento de algunos términos y conceptos con los cuales se deben trabajar. Por ello, se hizo énfasis en explicar conceptos fundamentales sobre las descargas atmosféricas como fenómenos naturales, los efectos de los rayos y como inciden estos en los parques fotovoltaicos (directa como indirectamente); se pudo constatar la situación climatológica actual en la provincia de Villa Clara, especialmente como influye esta de manera negativa en el correcto funcionamiento de instalaciones eléctricas por concepto de impactos de rayos en el año. Se analizó el papel que juega el sistema de puesta a tierra en las instalaciones fotovoltaicas y la importancia que tiene el correcto diseño del mismo para garantizar en ellas una correcta operación.

CAPITULO 2. PROYECTO DE MONTAJE Y PROTECCIÓN DEL PARQUE FOTOVOLTAICO UCLV

La instalación de un parque fotovoltaico representa una inversión considerable fundamentalmente en economías de países no desarrollados; los componentes tanto eléctricos como electrónicos, dígame el grupo de paneles, así como los inversores o la subestación necesaria para la conexión con el sistema de potencia correspondiente, representan el mayor capital inicial en el proyecto del parque. El sistema de protección contra descargas atmosféricas de un parque fotovoltaico es el que garantiza el buen funcionamiento del mismo y protege sus partes fundamentales, sobre todo en situaciones de adversidades meteorológicas, lo que aumenta su vida útil y garantiza protección al personal que trabaja en la instalación.

2.1 Proyecto Parque Fotovoltaico UCLV

En Cuba el proyecto de diseño y cálculo de los parques fotovoltaicos está a cargo de la Empresa de Ingeniería para la Electricidad (INEL); encargándose además del montaje y puesta en marcha de los mismos. Los cursos de nivelación para operarios son confeccionados e impartidos por la empresa de Hidroenergía, de esta forma se proporciona el conocimiento necesario para la manipulación correcta de la instalación.

El Proyecto “Parque Fotovoltaico UCLV” nace precisamente en la INEL, formando parte de la matriz de generación mediante fuentes de energías renovables. Se espera sea inaugurado en semanas y automáticamente será conectado al SEN mediante la red de subtransmisión de 34.5 kV que llega a la universidad.

CAPÍTULO 2. PROYECTO DE MONTAJE Y PROTECCIÓN DEL PARQUE FOTOVOLTAICO UCLV

2.1.1 Ubicación y características generales

El Parque Fotovoltaico UCLV, como indica su nombre, está ubicado detrás de la Facultad de Ingeniería Eléctrica en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, en Santa Clara, Cuba.

Técnicamente, se emplean como base las normas siguientes:

- NC 800-1 Código Electrotécnico Cubano. Parte 1: Baja Tensión.
- IEEE STD 80-2013 Guide for Safety in AC Substation Grounding.

Los parques se alimentarán por media tensión a través de una línea aérea o soterrada de 34.5 kV y la tensión secundaria será de 240/415 V, trifásico con un régimen de puesta a tierra del neutro TN-S. Todos los conductores activos tendrán un aislamiento de 0.6/1 kV, el aislamiento primario de XLPE y la funda exterior de PVC (Doble forro). Los cables verde-amarillo empleados para la protección, tendrán aislamiento de 450/750 V (Un solo forro). El código de colores será según el Código Electrotécnico Cubano:

Fase A: Negro; Fase B: Marrón; Fase C: Gris; Neutro: Azul Claro; Protección: Verde-Amarillo.

Todas las envolventes de los tableros serán metálicas y las barras estarán también bajo envoltente.

Se utilizan paneles solares con las siguientes características; ensamblado en China con componentes de China con una potencia nominal de 265 Wp, los valores de voltaje y corriente nominales son 12 VCD y 15 A respectivamente. Los inversores que se encuentran instalados son de origen alemán de la marca SMA tipo SUNNY TRIPOWER de una potencia de 17000 W con una relación de voltajes de 600 VCD, 400 VCA como se muestra en la figura 2.1.

CAPÍTULO 2. PROYECTO DE MONTAJE Y PROTECCIÓN DEL PARQUE FOTOVOLTAICO

UCLV



Figura 2.1. Inversor SMA de 17kW. Fuente: El autor.

Cada inversor de 17 kW se colocará en un punto medio de los paneles solares y a partir de estos irán alimentadores hacia tableros concentradores los cuales tienen conectados un grupo entre siete y ocho inversores, estos paneles concentradores son los encargados de aislar sectores del parque para posible mantenimiento u otros motivos el grupo de paneles concentradores tributarán a un Centro General de Distribución el cual se conecta a la subestación de enlace con el Sistema Electroenergético Nacional (SEN).

Cada panel concentrador cuenta con un desconectivo para cada inversor, así como un desconectivo general para el panel; por su parte el Centro General de Distribución cuenta con los respectivos desconectivos para cada panel concentrador, así como otros dispositivos de control como los PLC y dispositivos de monitoreos encargados de brindar información en tiempo real acerca de la situación del parque en general.

2.1.2 Malla de puesta a tierra

El diseño del sistema de puesta a tierra fue realizado mediante el software CYME, un programa profesional para el análisis de redes eléctricas. [14]

CAPÍTULO 2. PROYECTO DE MONTAJE Y PROTECCIÓN DEL PARQUE FOTOVOLTAICO

UCLV

Según el proyecto la malla de tierra consiste en dos anillos principales, uno interior y uno exterior. El anillo exterior se extiende un mínimo de 1m por fuera de la cerca perimetral, y está equipotencializada con las mallas interiores y la cerca perimetral en diferentes puntos de su extensión, incluyendo las partes móviles o batientes. Los electrodos verticales en la malla exterior están ubicados en las esquinas y la malla de tierra se instaló a 0.8 m por debajo del nivel del terreno, excepto en los tramos en que coinciden con la traza de conductores de 70 mm² enterrados en zanja a 1 m, en estos tramos la malla se instaló por debajo de las trazas.

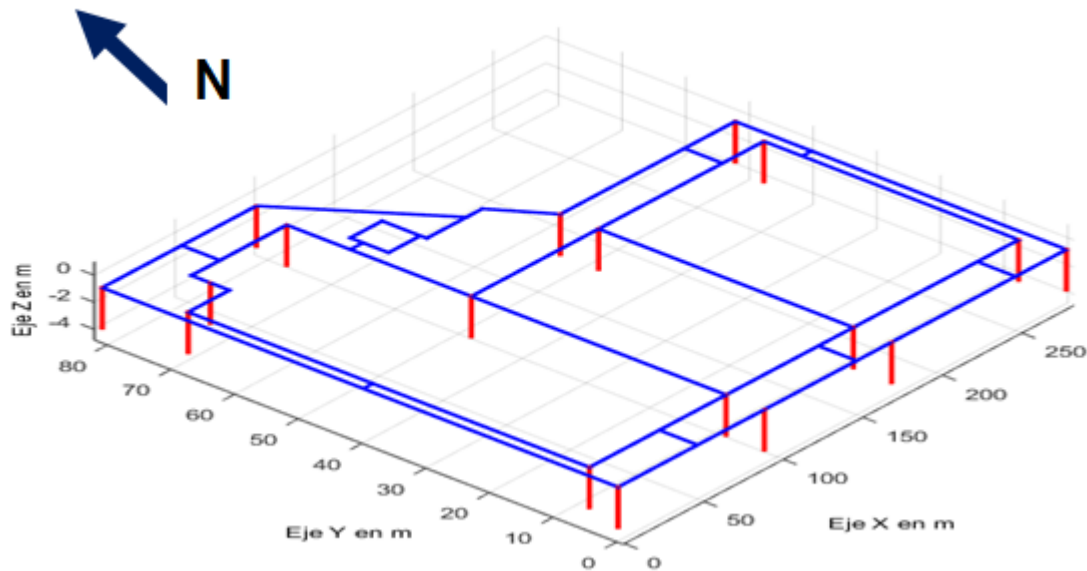


Figura 2.2. Vista tridimensional de la malla de tierra.

Como parte del sistema de puesta a tierra se colocarán electrodos verticales del tipo *copperweld* de 3 metros de largo separados a una distancia entre los 10 y 15 metros. La unión de la malla con los electrodos verticales se realizará con conectores GP 6429 y la unión entre los puntos que no cuentan con electrodos verticales se realiza con el conector GX 2929.[12]

2.1.3 Conexión de la subestación a la malla de tierra

Tanto la caseta como el transformador se rodearán con un anillo de tierra. El acero de refuerzo de la balsa donde se colocará el transformador se interconectará con la malla de tierra por dos lugares mediante perros conectores QPX-4428. El tanque del transformador también se pondrá a tierra por dos lugares. El neutro del transformador se pondrá a tierra en el lugar de montaje y se procederá de la siguiente manera:

El *bushing* de tierra del transformador tendrá un terminal de 3 conductores de 240 mm², dos conductores irán por la bandeja hacia la barra de neutro del Centro General de Distribución (CGD) y el tercero irá a conectarse al anillo de tierra que rodea la base del transformador. El totalizador de 4 polos recibirá 2 conductores por fase de 400 mm² para las fases, 2 conductores de 240 mm² para el neutro. La barra de tierra del CGD se conectará con la malla de tierra con tres conductores de 70 mm². Para que funcione correctamente la protección contra falla a tierra NO se puentean las barras de neutro y tierra. Las corrientes de falla NO pueden pasar por el polo Neutro.

2.1.4 Los pozos de tierra

Los nodos de unión entre conductores, que no tienen electrodos verticales se unirán con los conectores GX 2929. En los puntos indicados en el plano con electrodos verticales se emplearán los conectores GP 6429 como indica la figura 2.3. Los conectores GAR 1429 se usarán en la protección contra el rayo de los postes de iluminación exterior. Los electrodos verticales copperweld serán de 3 metros, los registros se construirán in situ de hormigón. Sus dimensiones permitirán el uso de herramientas para apretar o aflojar las conexiones soldadas.

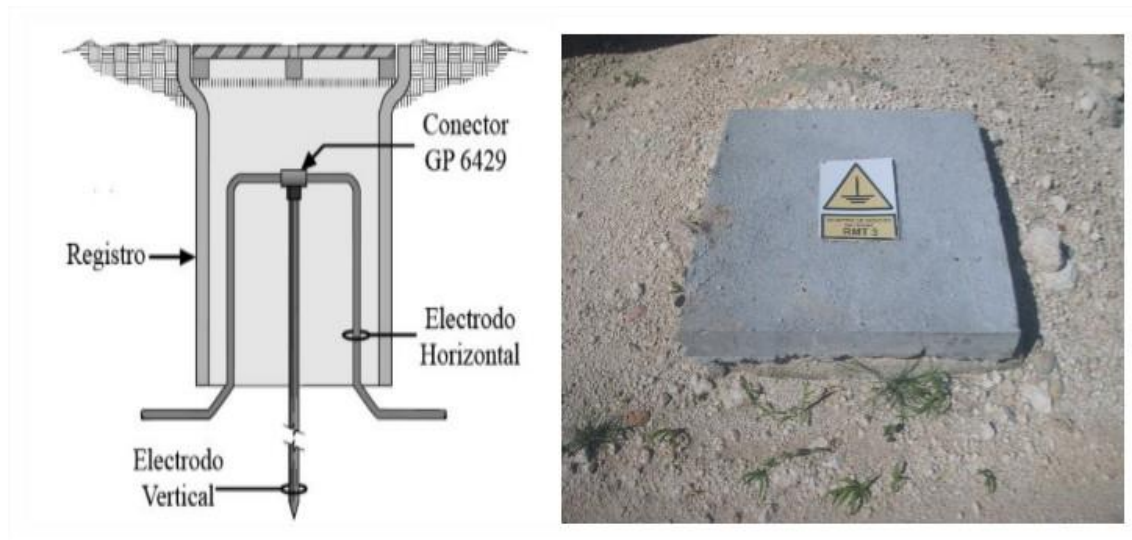


Figura 2.3. Detalles de los pozos de tierra.

Estos pozos de tierra son puntos fundamentales para la observación del estado del aterramiento, así como para la medición del índice de resistividad del sistema de tierra y por supuesto la calidad del aterramiento.

2.1.5 Equipotencialización en el sistema

Será sumamente importante la equipotencialización de las mesas que soportan los paneles solares con la estructura adyacente, tal y como indica la figura 2.4 y en los extremos de la hilera con el anillo de tierra. De igual forma cada mesa aislada, tendrá al menos un punto de conexión con la malla de tierra.

CAPÍTULO 2. PROYECTO DE MONTAJE Y PROTECCIÓN DEL PARQUE FOTOVOLTAICO

UCLV

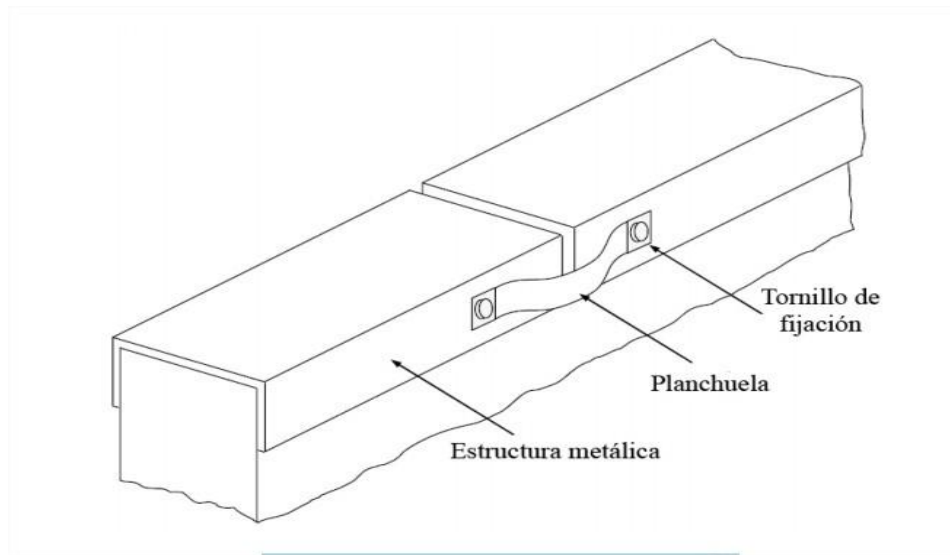


Figura 2.4. Medios de equipotencialización de los tableros.

La figura muestra cómo se procede a la equipotencialización de los tableros a través de una planchuela atornillada en los dos extremos de tableros diferentes de esta manera queda interconectados entre sí. La conexión a la malla a tierra se hará en los extremos de las hileras de tableros, como se muestran en la figura 2.5, de esta manera quedan interconectados todos los tableros con la malla de tierra. La unión se realizará con un conductor de cobre trenzado que se atornilla a la estructura de acero galvanizado. El punto de unión se debe señalar con el cartel con el rótulo de tierra. En estos puntos se realizará la medición periódica del estado de aterramiento, así como el buen estado de la conexión y el mantenimiento y ajuste de la unión a la malla de tierra.

CAPÍTULO 2. PROYECTO DE MONTAJE Y PROTECCIÓN DEL PARQUE FOTOVOLTAICO

UCLV



Figura 2.5. Punto de conexión de la hilera de tableros con la malla de tierra.

Otra forma de conexión con la malla de tierra es mediante el acero estructural. Siempre que sea posible, se unirá todo el acero de refuerzo del hormigón armado a la malla de tierra mediante cables de cobre y conectores de bronce adecuados, tal y como indica la figura 2.6.

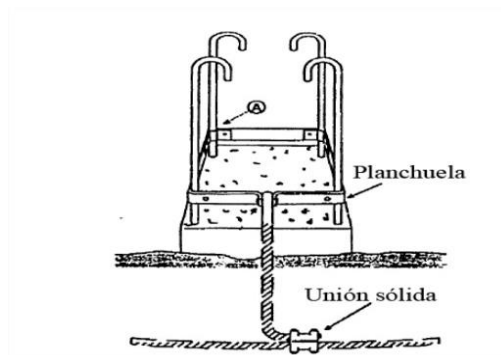


Figura 2.6. Equipotencialización del acero estructural con la malla de tierra.

2.1.6 Puesta a tierra de las cercas

Es de señalar que la malla de tierra se extiende al menos un metro por fuera de la cerca, con la consideración, incluso del abatimiento de las puertas, si abren hacia fuera como se muestra en la figura 2.6. Toda parte móvil, como las puertas, se equipotencializan con una parte fija puesta a tierra mediante conexiones flexibles, de modo que sea duradera en el tiempo (ver figura 2.7). Dos metales bien equipotencializados poseerán un valor de continuidad eléctrica del orden de los $m\Omega$.

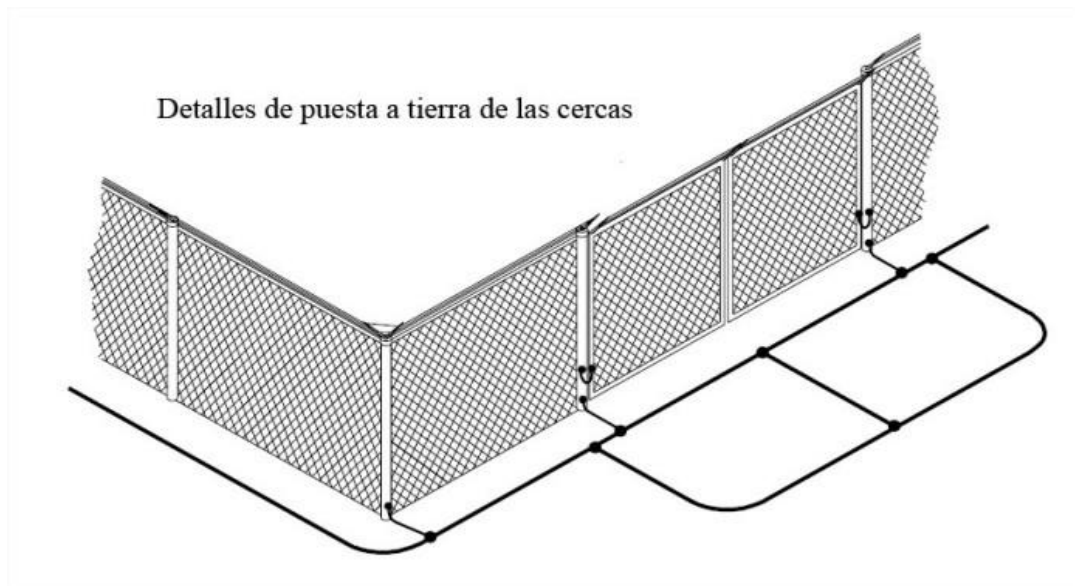


Figura 2.7. Extensión de la malla de tierra por fuera de la cerca y conexión con esta.

CAPÍTULO 2. PROYECTO DE MONTAJE Y PROTECCIÓN DEL PARQUE FOTOVOLTAICO

UCLV

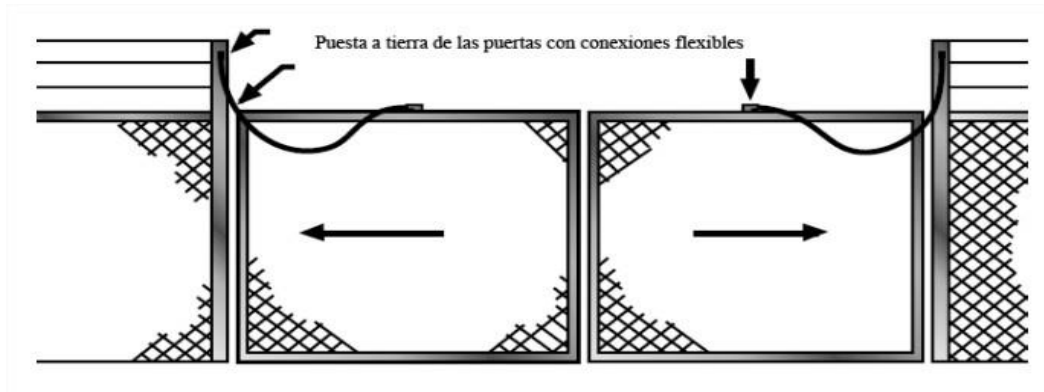


Figura 2.8. Conexiones flexibles a tierra de partes móviles.

De esta manera se protege la totalidad del cercado perimetral y se evitan accidentes que pudieran ser fatales para los operarios o personal ajeno a la instalación.

2.1.7 Puesta a tierra de la red de datos

La conexión a tierra de las pantallas de los cables STP debe realizarse con conectores que abarquen los 360° a la redonda. En la figura 2.9, se muestra uno de los medios para ello.

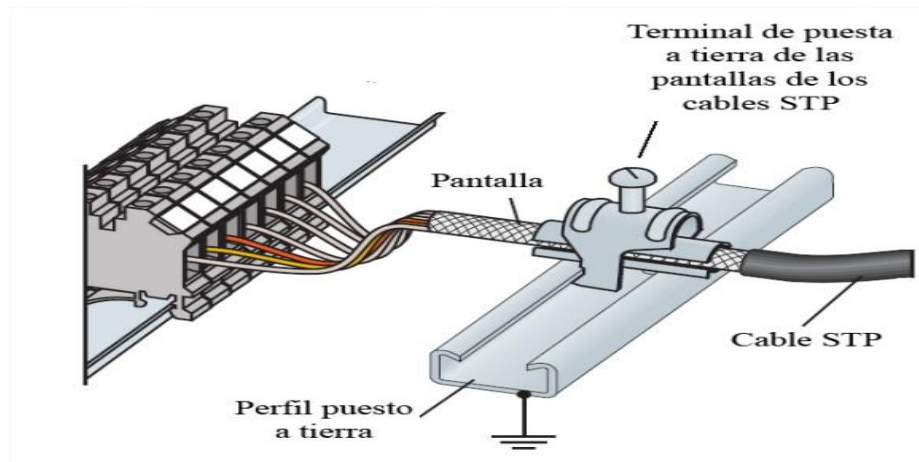


Figura 2.9. Puesta a tierra de la pantalla de los cables sensibles a perturbaciones.

Largas redes de cables de comunicación que emplean cobre, no solo elevan los riesgos de ruptura de aislamiento por descargas de rayos, sino que en condiciones

CAPÍTULO 2. PROYECTO DE MONTAJE Y PROTECCIÓN DEL PARQUE FOTOVOLTAICO UCLV

normales de trabajo pueden traer funcionamiento inadecuado por perturbaciones debido a las corrientes por los lazos de tierra. Estas corrientes son muy difíciles de eliminar debido a las diferencias de potencial en las referencias de tierra que toma la pantalla en sus extremos.

Las dos posibles soluciones serían:

1. Equipotencializar la pantalla con la malla de tierra cada 15 metros. Este método tiene la dificultad del estancamiento del agua en redes exteriores.
2. Poner la pantalla en uno de sus extremos a tierra a través de un supresor de sobretensiones que impida las corrientes por los lazos de tierra en condiciones normales y que cortocircuite a tierra el extremo aislado, en caso de un impacto de rayo.[12]

Por el costo y los riesgos de ambas soluciones es muy recomendable el progreso a los medios ópticos de comunicación.

2.2 Análisis del sistema de protección contra impactos directos de descargas atmosféricas sobre la instalación

Las instalaciones fotovoltaicas tienen como características la ocupación de amplios terrenos lo que los hace vulnerables al impacto directo de las descargas atmosféricas. La colocación de un sistema de barrillas protectoras (pararrayos) es indispensable para la protección de la instalación. En el diseño actual de la instalación el nivel de protección contra las descargas directas sobre el parque no es el óptimo, ya que la ubicación de los pararrayos existentes no le brinda máxima protección al mismo, ya que gran parte del área que ocupa dicho parque queda fuera del rango de protección de los pararrayos instalados tal como se puede apreciar en la figura 2.10.

CAPÍTULO 2. PROYECTO DE MONTAJE Y PROTECCIÓN DEL PARQUE FOTOVOLTAICO

UCLV

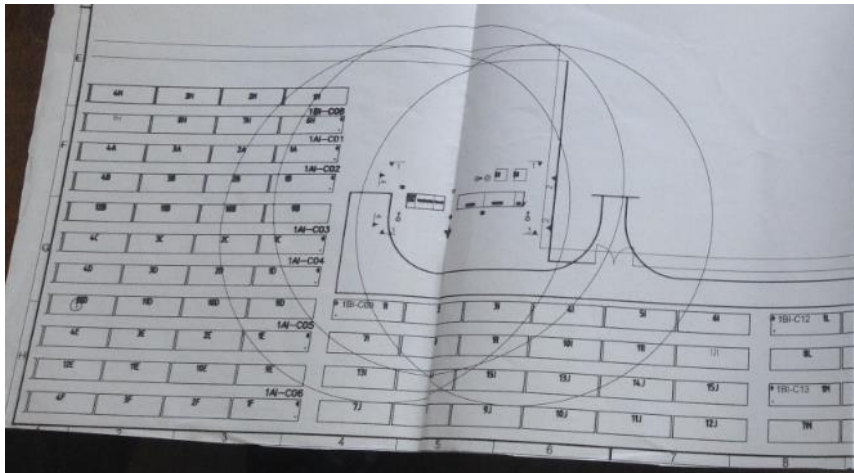


Figura 2.10. Zona protegida según el proyecto.

Se realiza la colocación de varillas protectoras en las luminarias del cercado perimetral que cuenten con postes de hormigón para evitar la destrucción del mismo, se coloca una punta Franklin de acero conectada a un cable desnudo de 70mm^2 que lo equipotencializará con la malla de tierra, el brazo de la luminaria también se conectará al cable protector (se muestra en la figura 2.11). La punta Franklin se elevará unos 300 milímetros sobre el poste.

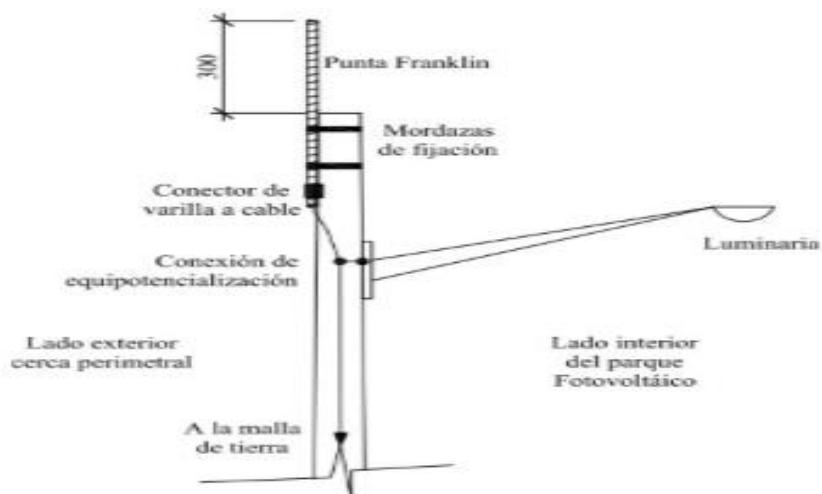


Figura 2.11. Poste de alumbrado con punta Franklin.

CAPÍTULO 2. PROYECTO DE MONTAJE Y PROTECCIÓN DEL PARQUE FOTOVOLTAICO UCLV

Estas puntas Franklin se encuentran también como protección de las casetas y la subestación, en algunos casos sobre las azoteas como muestra la figura 2.12 y en otros casos sobre postes de hormigón destinados a esto.



Figura 2.12. Vista de pararrayos sobre caseta de inversores. Fuente: El autor.

En la imagen anterior se puede apreciar cómo quedan montados los pararrayos sobre la caseta de la subestación con una elevación de aproximadamente 1.5 metros sobre el nivel del techo de la caseta. Vale destacar que en el parque se han instalado hasta el momento 6 pararrayos que se encuentran alrededor de la caseta de subestación (siendo los únicos existentes). Faltan por instalar y proteger las luminarias con punta Franklin como aparece en los requerimientos.

Debido a la gran extensión de área necesaria para la generación fotovoltaica, no es suficiente con la colocación de pararrayos solo en casetas y en la torre de control ya que queda gran parte del parque fuera de la zona de protección de estos pararrayos y por su puesto el peligro inminente del impacto directo de un rayo sobre el panel descubierto el cual no está preparado para un fenómeno como este.

CAPÍTULO 2. PROYECTO DE MONTAJE Y PROTECCIÓN DEL PARQUE FOTOVOLTAICO

UCLV

2.3 Resumen de la consulta al proyecto de diseño

Con la consulta al proyecto del parque fotovoltaico, se pudo tener acceso a datos técnicos de diseño que posteriormente serán analizados y que permitirán realizar una evaluación integral del sistema de protección contra descargas atmosféricas y del sistema de puesta a tierra. La tabla 2.1, muestra especificaciones de algunos datos de interés en el estudio del parque.

Tabla 2.1. Especificaciones técnicas generales obtenidas del Proyecto "Parque Fovoltaico UCLV.

Datos de partida	
Resistividad térmica del suelo	ρ 13 ohm-m
Electrodo de acero cobrizado de	Ø 19 x 300 mm
Área de la malla	16756000000 mm ²
Longitud de la malla	1400000 mm
Número de electrodos	18 u
Valor de la Icc 3Ø	5,8 kA(en la SE de Alimentación)
Profundidad de enterramiento	800 mm
Conductor utilizado	70 mm ² de cobre desnudo y trenzado
Tensión utilizada	34.5 kV

Consideraciones generales

- El valor de la malla de tierra especificada para el parque Solar Fovoltaico con la configuración mostrada y los datos de partida señalados, ofrecen un valor de resistencia propia de 0.05 Ω .
- Utilizando como valor promedio una longitud de 5000 m, entre la subestación de alimentación y el parque Solar Fovoltaico, el valor de la resistencia equivalente de puesta a tierra de un alimentador es del orden de 1 Ω .
- Al estar definido el conductor a emplear en la malla de tierra, el cual es de 70 mm² se obviaron las expresiones para el cálculo de la sección del mismo.

CAPÍTULO 2. PROYECTO DE MONTAJE Y PROTECCIÓN DEL PARQUE FOTOVOLTAICO UCLV

Como se observa a continuación y formando parte de los resultados avalados en el proyecto mediante mediciones de terreno, la tabla 2.2 muestra la resistencia de puesta a tierra censada en diferentes partes del parque con respecto a la malla.

Tabla 2.2. Mediciones de la resistencia de puesta a tierra.

Sistema de puesta a tierra del Parque Fotovoltaico (PFV) UCLV	
Localización en el PFV	Resistencia en ohm
Zona A	0.40
Zona B	0.36
Zona C	0.31
Entre mesas Zona B	0.16
Entre mesas Zona C	0.20
Luminarias Exteriores	0.93
Luminarias interiores	0.42
Unión equipotencial garita entrada	0.18
Unión equipotencial cuarto de control	0.20
Resistencia promedio	0.35

2.4 Conclusiones del capítulo

La revisión del Proyecto Parque Fotovoltaico UCLV, permitió la extracción de datos necesarios los cuales serán utilizados para realizar los cálculos pertinentes en el proceso de diseño óptimo del sistema de protección contra descargas atmosféricas en dicha instalación. Se debe destacar que el proyecto contiene información sobre mediciones reales realizadas al sistema de puesta a tierra, las cuales reúnen los requisitos establecidos para que se estimen en su totalidad y tributen a resultados futuros más exactos.

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y PROPUESTA DE SOLUCIONES

En este capítulo se hace de un análisis del sistema de puesta a tierra y de las protecciones contra descargas atmosféricas instaladas en el Parque Fotovoltaico UCLV, tomando los datos adquiridos según el estudio realizado en el Capítulo 2. Los datos provenientes del proyecto de diseño, acompañados con mediciones reales en el terreno, son procesados mediante software profesionales con el fin de evaluar cuan fiables son desde el punto de vista técnico y a partir de los resultados, poder proponer un sistema integral de protección contra descargas atmosféricas (que incluye el sistema de puesta a tierra).

3.1 Software para el cálculo de protecciones contra descargas atmosféricas

El uso de software profesionales es imprescindible para la precisión en el cálculo de la protección contra descargas atmosféricas y sobretensiones en cualquier instalación. Con este fin, se utilizaron los softwares: *Lightning Solutions*, *FotoProt* y *PAST*, todos creados en el Centro de estudios

3.1.1 Software Lightning Solutions

Este software está creado para agilizar el trabajo de los ingenieros a la hora de calcular las protecciones externas de cualquier edificación ante descargas atmosféricas. El programa fue desarrollado en MATLAB, herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado, entre sus principales prestaciones están: la representación de datos, funciones, implementación de algoritmos y potencialidades gráficas importantes. [9]

Interfaz gráfica

La interfaz gráfica se muestra a continuación en la figura 3.1.

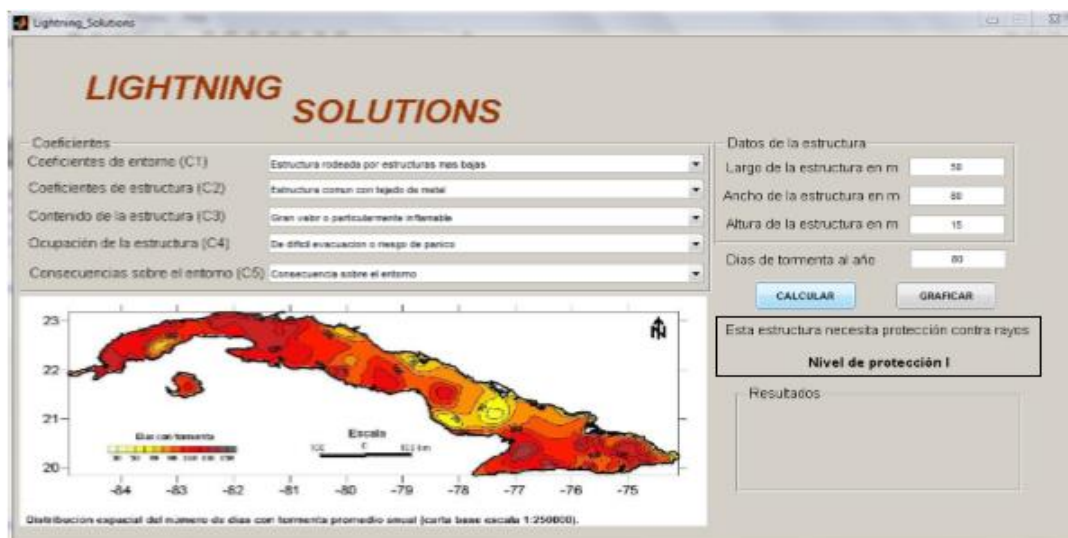


Figura 3.1. Software *Lightning Solutions*. [9]

Procedimiento de cálculo

En primer lugar, se debe determinar si la instalación necesita o no de un Sistema de Protección Contra Descargas Atmosféricas (SPDA), y en dependencia de si la necesita o no, establecer el nivel de protección de la instalación.

El **nivel de protección** es la capacidad que tiene el SPDA de proteger la instalación donde ha sido implementado contra los efectos de las descargas atmosféricas. A la hora de determinar si se requiere o no la instalación de un Sistema de Protección contra Descargas Atmosféricas se deben manejar los siguientes conceptos:

- Frecuencia de impactos directos de descargas atmosféricas en estructuras: Promedio de impactos directos de descargas atmosféricas a una estructura esperados durante un año. Es preciso auxiliarse del mapa isoceráunico de la región con la correspondiente actualización.
- Frecuencia de descargas atmosféricas aceptada: Promedio anual máximo aceptado en un año de descargas atmosféricas que pudieran causar daño a una

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y PROPUESTA DE SOLUCIONES

estructura. Su valor debe ser establecido por el dueño de la edificación o por el diseñador del SPDA.

El nivel de protección de un SPDA se deriva de la eficiencia que se requiera del mismo para proteger debidamente al equipo o estructura en cuestión; considerando **la eficiencia** de acuerdo al nivel de protección, indica la garantía que ofrece el SPDA de proteger la estructura en la que ha sido instalado. Teniendo en cuenta el valor de la eficiencia y auxiliándose de la Tabla 3.1, se selecciona el nivel de protección a utilizar.

Tabla 3.1. Nivel de protección necesario en la estructura calculado por el *Lightning Solutions* de acuerdo a la eficiencia requerida. [9]

Nivel de Protección	Eficiencia del SPDA
I	0.98
II	0.95
II	9
IV	8

3.1.2 Software FotoProt

Este software consiste en una aplicación de interfaz gráfica (figura 3.2) dotada de una herramienta de cálculo la cual permite introducirle los datos de dimensiones del parque; la altura de los objetos energizados más altos dentro del parque; la altura del mástil de que se dispone y la densidad de rallo a tierra de la zona donde se desea construir el parque, este último dato se obtiene de un mapa cerámico. Con estos datos es capaz de determinar la cantidad de mástiles necesarios para lograr una protección total, así como su ubicación dentro de la instalación, como salida del programa se puede tener una gráfica de la posición de los mástiles y sus respectivas áreas de protección. [5]

Interfaz gráfica



Figura 3.2. Interfaz gráfica del software *FotoProt*. [5]

Como se muestra en la figura 3.2, *FotoProt* cuenta con tres menús fundamentales: Datos, Calcular y Resultados.

En el primer menú cuenta con tres submenús: Insertar Datos (figura 3.3), Cargar Datos y Guardar Datos, todos diseñados para el manejo de los datos de los estudios realizados.

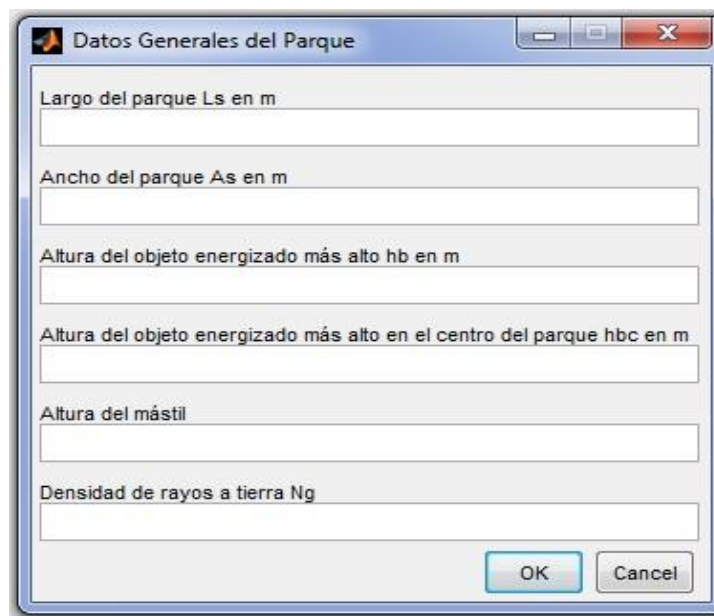


Figura 3.3. Plataforma de entrada de datos en el software *FotoProt*.

La figura 3.3, (Datos Generales del Parque) muestra el panel de introducción de datos principales; mediante esta interfaz se puede introducir los datos de un nuevo proyecto o estudio.

El segundo menú cuenta con el submenú Mástil, encargado de realizar los cálculos.

El último menú, Resultados, cuenta con dos submenús Mostrar Resultados y Graficar Resultados. Los resultados del estudio se graficarán según la ubicación de los mástiles en el área del parque para una protección total del área de la instalación.

3.1.3 Software PAST

Basado en el Método de las Imágenes de Maxwell, el software *PAST* (Programa para el Proyecto y Análisis de Sistemas de Tierra) elaborado en Matlab cuenta con un ambiente amistoso y fácil de operar, la figura 3.4 muestra su ventana principal.[13]

Interfaz gráfica



Figura 3.4. Interfaz gráfica del *PAST*.

Como se muestra en la figura 3.4, el software *PAST* cuenta con cuatro menús fundamentales: Ficheros, Datos, Cálculos y Resultados.

El menú Datos cuenta con un submenú Terrenos Homogéneos (figura 3.5), que a su vez cuenta con otros tres submenús, donde el primero, Crear Fichero de Datos

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y PROPUESTA DE SOLUCIONES

(figura 3.6), permite introducir los datos del proyecto a diseñar (especificaciones de la malla de tierra y del terreno en donde está enclavado el sistema).

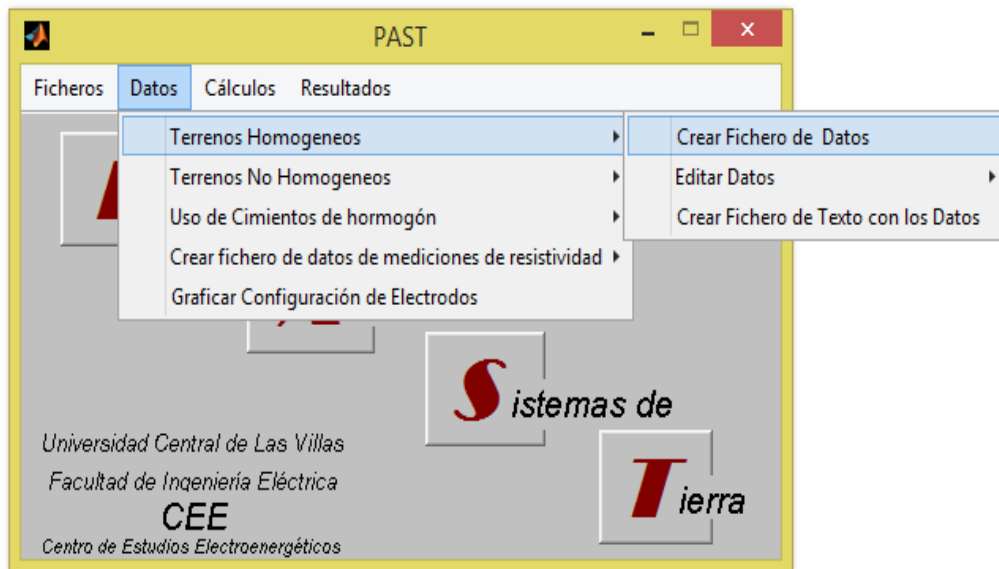


Figura 3.5. Acceso a la plataforma de introducción de datos. [13]

The image shows a dialog box titled 'Datos Generales d...'. It contains several input fields with numerical values: 'Resistividad del Terreno en Ohm.m' (0), 'Numero de Conductores Horizontales por eje X' (0), 'Numero de Conductores Horizontales por eje y' (0), 'Numero de Conductores en ángulo' (0), 'Diámetro de los conductores en m' (0), 'Numero de Barras Verticales' (0), 'Diámetro de las Barras en m' (0), 'Corriente máxima inyectada en el terreno en A' (0), 'Tiempo de duración de la corriente en s' (0), 'Resistividad de la capa superficial Ohm.m' (0), 'Espesor de la capa superficial en m' (0), and 'Si peso 50 kg (poner 50), Si peso 70 kg (poner 70)' (0). At the bottom right, there are 'OK' and 'Cancel' buttons.

Figura 3.6. Plataforma de introducción de datos en el PAST.

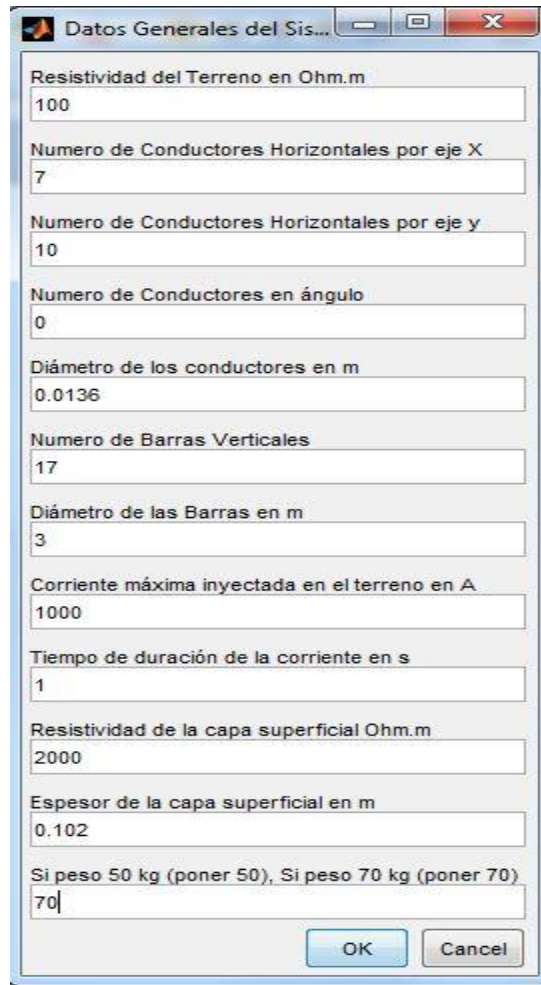
El software *PAST* realiza estudios para terrenos considerados homogéneos (tipo de terreno considerado en el trabajo según las características propias) y para los formados por varios estratos (no homogéneos); permite el diseño de sistemas de puesta a tierra de alta complejidad, tanto a criterio del diseñador como de forma automática buscando un valor de resistencia de conexión a tierra deseado, diseña sistemas de puesta a tierra de reticulado uniforme de subestaciones, optimiza el diseño de mallas uniformes garantizando potenciales de paso y de contacto admisibles. Con el empleo de este software, se tiene la posibilidad de conocer la interacción de sistemas de puesta a tierra independientes, pero que bajo determinadas condiciones pueden influir los unos sobre los otros.

3.2 Chequeo de la resistencia de puesta a tierra (RPT)

El sistema de puesta a tierra del Parque Fotovoltaico UCLV está constituido por dos anillos de electrodos horizontales interconectados entre sí (formando en su interior tres módulos de malla), a los cuales se conectan todas las estructuras metálicas de la instalación (como se pudo apreciar en el Capítulo 2), especialmente las mesas que sostienen los módulos de paneles. Para el chequeo de la resistencia de puesta a tierra se estudiaron los dos anillos conectados eléctricamente en paralelo (ventaja que brinda el uso del *PAST* en su propio procedimiento de cálculo). En la figura 2.2, expuesta en el capítulo anterior, se puede apreciar la configuración de electrodos en la malla del sistema de puesta a tierra (que incluye electrodos horizontales y verticales).

En la figura 3.7, se muestra el panel de introducción de datos en el *PAST*, mediante el cual se crea el fichero correspondiente con este sistema y que servirá al programa como base de datos para realizar el cálculo de la RPT.

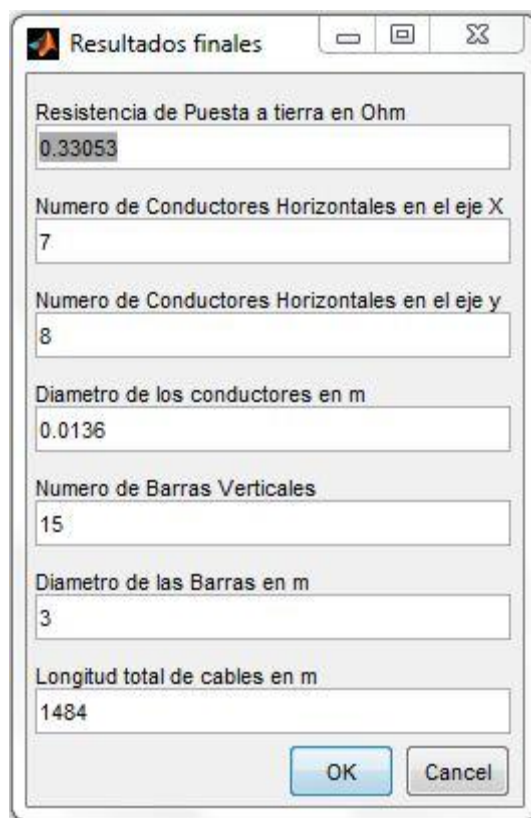
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y PROPUESTA DE SOLUCIONES



Parámetro	Valor
Resistividad del Terreno en Ohm.m	100
Numero de Conductores Horizontales por eje X	7
Numero de Conductores Horizontales por eje y	10
Numero de Conductores en ángulo	0
Diámetro de los conductores en m	0.0136
Numero de Barras Verticales	17
Diámetro de las Barras en m	3
Corriente máxima inyectada en el terreno en A	1000
Tiempo de duración de la corriente en s	1
Resistividad de la capa superficial Ohm.m	2000
Espesor de la capa superficial en m	0.102
Si peso 50 kg (poner 50), Si peso 70 kg (poner 70)	70

Figura 3.7. Datos generales del sistema para el cálculo de la RPT.

La resistencia de puesta a tierra según el proyecto está calculada para un valor de resistividad de 13 ohm-m, pero según las condiciones reales del terreno en estudio no se debe tomar dicho valor; una resistividad de 13 ohm-m es característica de terrenos con alto grado de agresividad salina y de corrosión, por ende, baja resistividad. [11]. Se toma un valor de 100 ohm-m, según las consultas realizadas en la bibliografía atendiendo al tipo de terreno que se estudia. La figura 3.8, muestra el panel de resultados, en donde se evidencia el valor de la RPT que provee la malla para este tipo de suelo entre otros factores influyentes en el procedimiento de cálculo.



Variable	Valor
Resistencia de Puesta a tierra en Ohm	0.33053
Numero de Conductores Horizontales en el eje X	7
Numero de Conductores Horizontales en el eje y	8
Diametro de los conductores en m	0.0136
Numero de Barras Verticales	15
Diametro de las Barras en m	3
Longitud total de cables en m	1484

Figura 3.8. Panel de resultados del programa PAST.

Se debe tener en cuenta que los anillos se encuentran eléctricamente interconectados entre sí (en paralelo), lo que influye en el valor de la resistencia de puesta a tierra la cual se estima en **0.33053 Ω** . Teniendo presente que el objetivo principal de todo sistema de puesta a tierra es dispersar la corriente en el terreno físico a través de la menor resistencia posible, y considerando la extensión del parque (lo que explica que la RPT sea considerablemente pequeña), se llega a la conclusión que el Parque Fotovoltaico UCLV cuenta con el **sistema de puesta a tierra idóneo** y por consiguiente, no se proponen acciones para su mejora.

3.3 Chequeo de la protección contra descargas atmosféricas

Para realizar el chequeo de la protección contra descargas atmosféricas en el parque, es necesario conocer no solo el estado actual de dicha protección, sino también cómo se comportaría la misma cuando se instalen los mástiles en los postes de luminarias, requerimientos normado y previsto según el proyecto de diseño.

3.3.1 Mástiles ubicados en las luminarias

Para efectuar el chequeo de los mástiles ubicados encima de las 16 luminarias perimetrales, se aplica el método de cálculo conocido como “esferas rodantes” (abordado en el capítulo 1), capaz de cuantificar el radio de protección que ofrece a la instalación la protección contra descargas correspondiente.

$$D = 10 * I^{0.65}$$

$$D = 10 * 10^{0.65}$$

$$D = 44.66 \text{ m}$$

Luego,

$$D^2 = r_0^2 + (D - h)^2$$

$$r_0 = \sqrt{D^2 - (D - h)^2} = \sqrt{h(2D - h)}$$

$$r_0 = \sqrt{10.3(2 * 44.66 - 10.3)}$$

$$r_0 = 28.53 \text{ m}$$

Notas:

- Se considera la intensidad del rayo $I = 10 \text{ kA}$.
- La definición de variables se puede apreciar en la descripción del método en el capítulo 1.

De forma gráfica se puede apreciar en la figura 3.9, el área de protección que se cubre mediante la ubicación de mástiles en la zona perimetral estudiada.

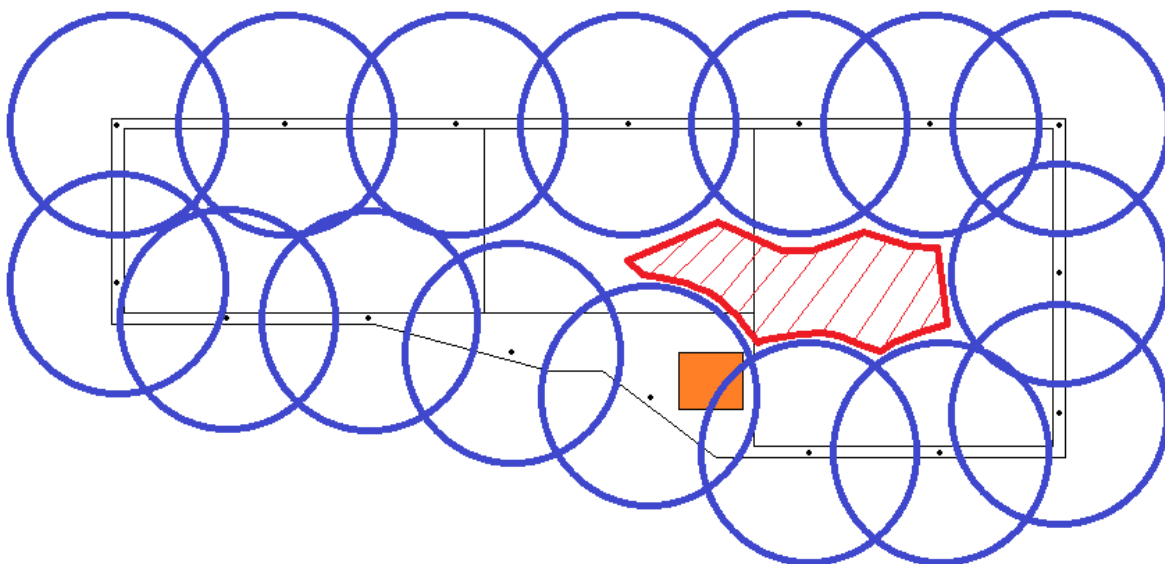


Figura 3.9. Área de protección garantizada con los mástiles colocados en las luminarias.

Como se observa, la instalación de mástiles sobre las luminarias cubre en gran medida el área de protección normada (cubrir todas las zonas internas del parque), pero existe una zona considerable que puede ser afectada por el impacto de rayos (señalada en rojo). El área desprotegida abarca aproximadamente 1000 m², lo que significa un 5.63 % del área total del parque (estimada en 17750 m²). Para este efecto, se debe estimar nuevamente el sistema de protección capaz de proteger incluso hasta la zona en rojo; en epígrafes posteriores se propondrán mejoras considerables.

El área señalada en color naranja, representa la zona de los inversores y centro de vigilancia, cuyo sistema de protección es estudiado de forma particular en el siguiente epígrafe.

3.3.2 Mástiles encima de la caseta de inversores

Como se acotaba en el epígrafe anterior, la zona del parque que contiene la caseta de inversores y el centro de vigilancia se puede apreciar en la figura 3.9 mediante un cuadro color naranja.

Esta zona de importancia significativa para el correcto funcionamiento del parque, debe ser protegida de forma especial en lo que a descargas atmosféricas se

refiere, puesto que contiene tecnología extremadamente sensible a este fenómeno natural.

De forma particular se muestra en la figura 3.10, la caseta de inversores y los 5 mástiles que fueron colocados a su alrededor.

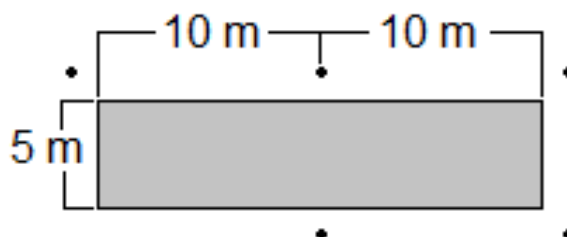


Figura 3.10. Vista superior de la caseta de inversores con sus respectivos mástiles protectores.

Para el chequeo de dicha protección se utiliza en software *Lightning Solutions*, el cual estima que por la interacción de elementos de protección colocados a alturas superiores (en este caso, por los mástiles colocados en las luminarias cercanas), la caseta de inversores **no necesita mástiles protectores** a su alrededor. En este aspecto, se hace una crítica positiva en el diseño proyectado, el cual establece la ubicación de 5 mástiles de 4.5 m de altura alrededor de la caseta; desde el punto de vista económico la instalación de estos pararrayos puede ocasionar mayores gastos por concepto de materiales e instalación propiamente dicha (incluyendo la mano de obra de montaje), pero se brinda mayor protección contra descargas atmosféricas a una zona que como se señalaba anteriormente, es muy importante y considerablemente sensible bajo la influencia de tormentas eléctricas.

3.3.3 Mástiles instalados en la Facultad de Ingeniería Eléctrica

Aunque no forman parte del Proyecto Parque Fotovoltaico UCLV, las protecciones contra descargas atmosféricas instaladas en la azotea de la Facultad de Ingeniería Eléctrica, podrían influir debido a la cercanía, en la protección del parque favoreciéndolo en este sentido. Precisamente en este epígrafe, se realiza un chequeo del nivel de protección que brindan los dos mástiles (puntas Franklin) mediante el Software *Lightning Solutions*.

Los mástiles instalados en los extremos laterales del edificio, pudieran aportar protección al parque si el radio de protección (calculado mediante el método de las esferas rodantes) tomara la suficiente distancia hasta llegar a zonas interiores del parque fotovoltaico.

Características del edificio

La Facultad de Ingeniería Eléctrica (FIE) está formada por un edificio de cuatro plantas con las siguientes dimensiones regulares: 108 x 12 x 15, correspondientes al largo, ancho y altura. Esquemáticamente, se aprecia en la figura 3.11 su posición con respecto al parque fotovoltaico (23 m de distancia), desde el extremo Oeste-Sur de la FIE hasta la puerta del parque como punto más cercano.

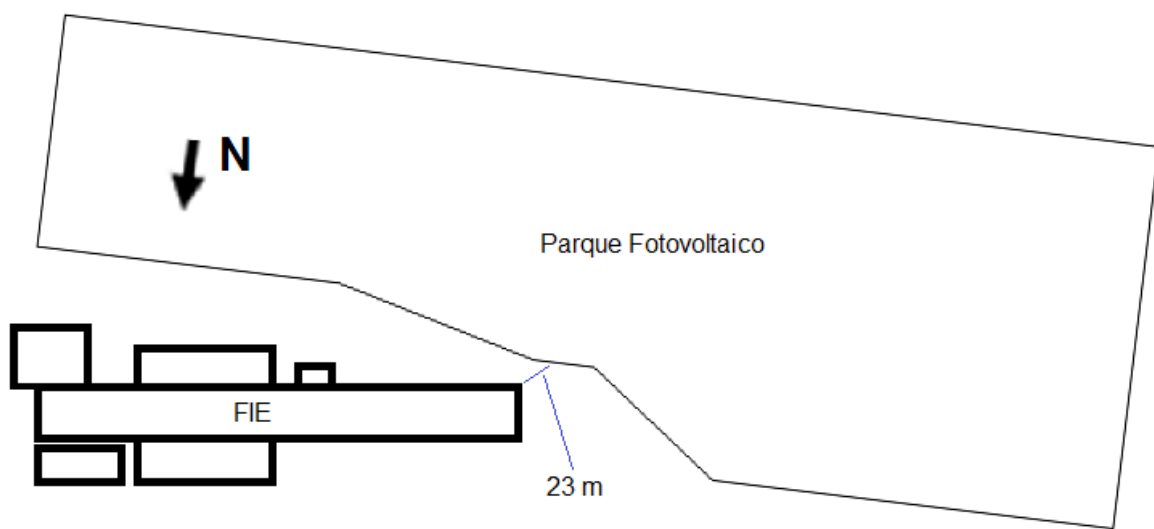


Figura 3.11. Posición de la Facultad de Ingeniería Eléctrica (FIE), con respecto al parque fotovoltaico.

Estudio realizado mediante el software *Lightning Solutions*

Usando el software *Lightning Solutions* para analizar el alcance de la protección contra descargas atmosféricas (mediante el método de las esferas rodantes), proveniente de los mástiles instalados en la FIE con respecto al parque fotovoltaico, se obtienen los siguientes resultados reflejados en la figura 3.12.

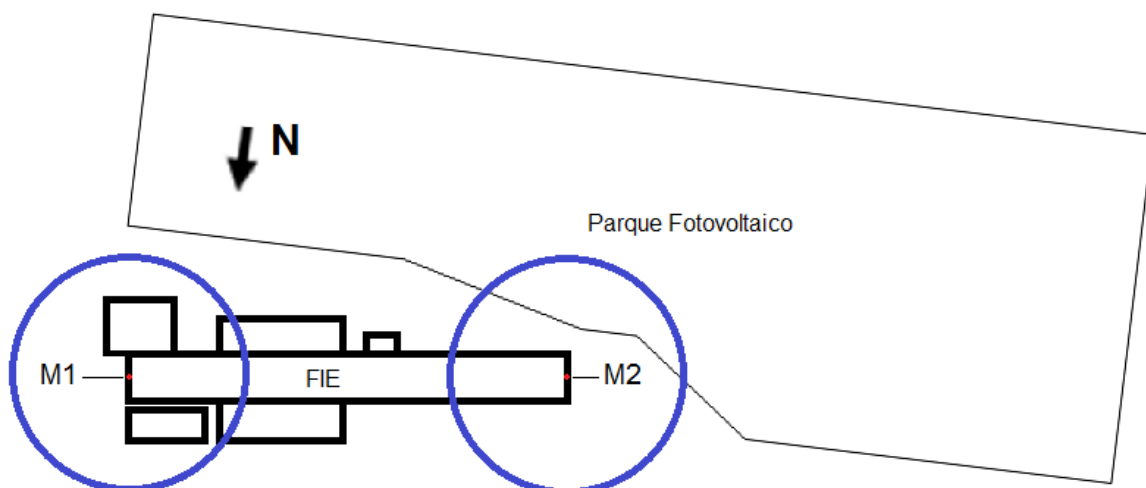


Figura 3.12. Alcance de las protecciones contra descargas atmosféricas instaladas en la FIE con respecto al parque fotovoltaico.

Los resultados obtenidos demuestran que los mástiles instalados en la FIE, no interfieren en la protección del parque fotovoltaico contra descargas atmosféricas. Para ambos mástiles el radio de protección obtenido es de 30.8 m, lo que significa cierta influencia del mástil M2 en territorio interno del parque (como se aprecia en la figura 3.12). Dicha influencia del mástil M2 en la protección del parque no es considerable, debido a la coincidencia de su área de protección con la calculada teniendo en cuenta los futuros mástiles ubicados en las luminarias instaladas en la periferia del propio parque. El mástil M1 queda descartado como fuente de protección debido a la lejanía que representa con respecto al extremo Este del parque.

Por otra parte, se demuestra que los mástiles ubicados en los extremos de la FIE no cubren el área de protección necesaria en el edificio, motivo para el que fueron diseñados y ubicados. Como no forma parte del tema principal tratado en este trabajo, no se proponen acciones para su solución, pero si queda reflejada esta agravante situación en las recomendaciones expuestas en el informe.

3.4 Protección óptima contra descargas atmosféricas

Teniendo en cuenta el chequeo a las protecciones contra descargas atmosféricas realizado en epígrafes anteriores, se propone una solución óptima a la problemática detectada; para ello, se utiliza el software FotoProt.

Introduciendo los datos requeridos para proceder con el cálculo de la cantidad de mástiles con sus respectivas ubicaciones, se destaca que el programa trabaja para estructuras uniformes, es decir, para analizar la protección óptima en este parque, se debe hacer una aproximación del área total (280 m x 80 m) reflejada mediante un rectángulo; la particularidad es que el área total analizada supera el área neta dentro de la cerca. En la figura 3.13, se puede apreciar de forma gráfica dicha aproximación teniendo en cuenta el área exterior considerada (señalada mediante líneas paralelas).

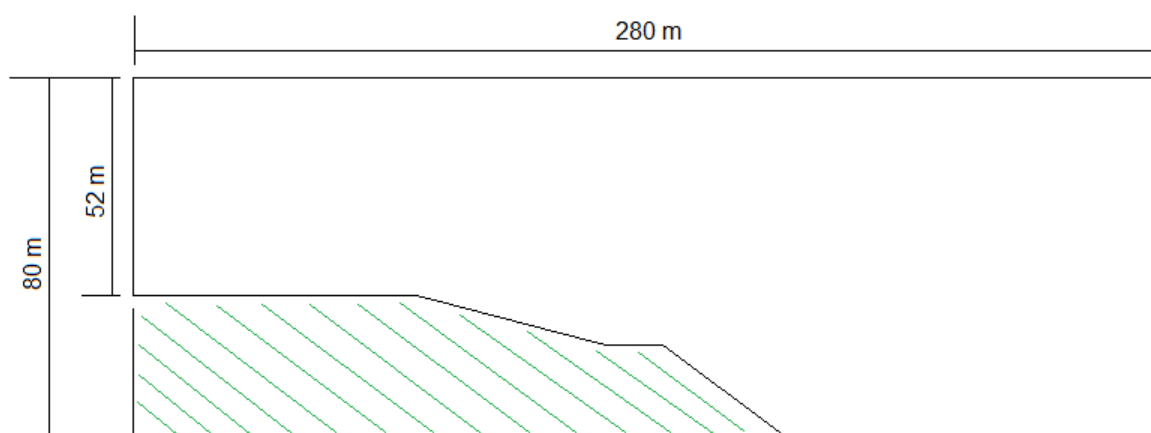


Figura 3.13. Área considerada para el cálculo mediante FotoProt.

Según los resultados obtenidos mediante el empleo de FotoProt, se propone la ubicación de 14 mástiles dentro del área estudiada, los cuales se distribuyen de forma regular en el terreno como se muestra en la figura 3.14. Los mástiles propuestos deben tener una altura de 10.3 m para brindar la protección necesaria. Es preciso acotar que se emplearon las siguientes variables (fundamentales) en el proceso de cálculo:

1. Altura del objeto energizado más alto: Altura del borde del módulo de panel solar más alejado del suelo (2 m).

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y PROPUESTA DE SOLUCIONES

2. Altura del mástil: Altura de los mástiles ubicados en las luminarias (10 m), con un incremento de 30 cm teniendo en cuenta la punta Franklin propuesta (10.3 m).
3. Densidad de rayos a tierra: Estimada mediante el mapa cerámico regional actual (4 rayos/km² al año).[2]

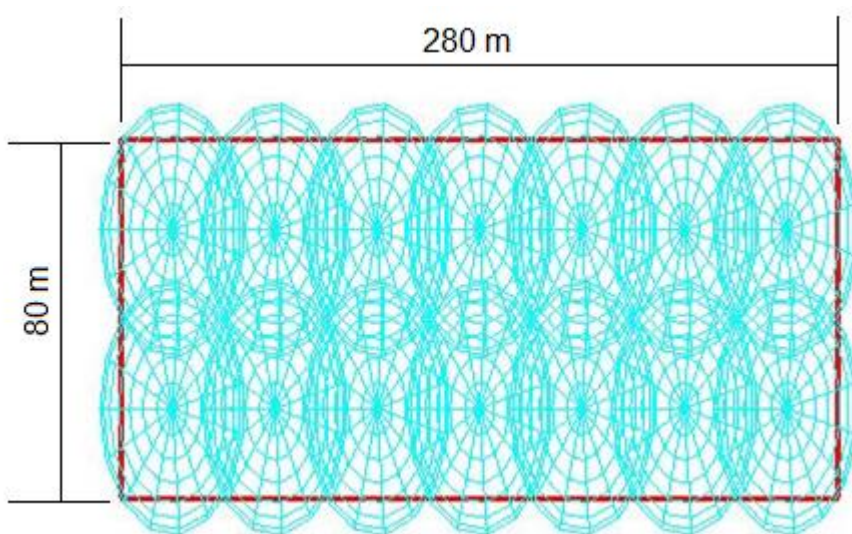


Figura 3.14. Ubicación de mástiles con sus respectivas áreas de protección individual según FotoProt.

Después de analizar los resultados obtenidos en aras de definir de forma óptima la protección contra descargas atmosféricas que necesita el parque, se tienen en cuenta las siguientes consideraciones:

1. El área de protección que garantizan los mástiles ubicados en las luminarias, cubre un 95 % de la superficie del parque.
2. El área de protección individual según los mástiles propuestos por FotoProt, solapan en gran medida las provenientes de los mástiles en las luminarias.
3. La caseta de inversores queda totalmente protegida; por los mástiles ubicados en luminarias cercanas y por los 5 mástiles que son ubicados a su alrededor.

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y PROPUESTA DE SOLUCIONES

Según las consideraciones anteriores, se establece de forma óptima el sistema de protección contra descargas atmosféricas. Esquemáticamente, se puede apreciar la propuesta mediante la figura 3.15.

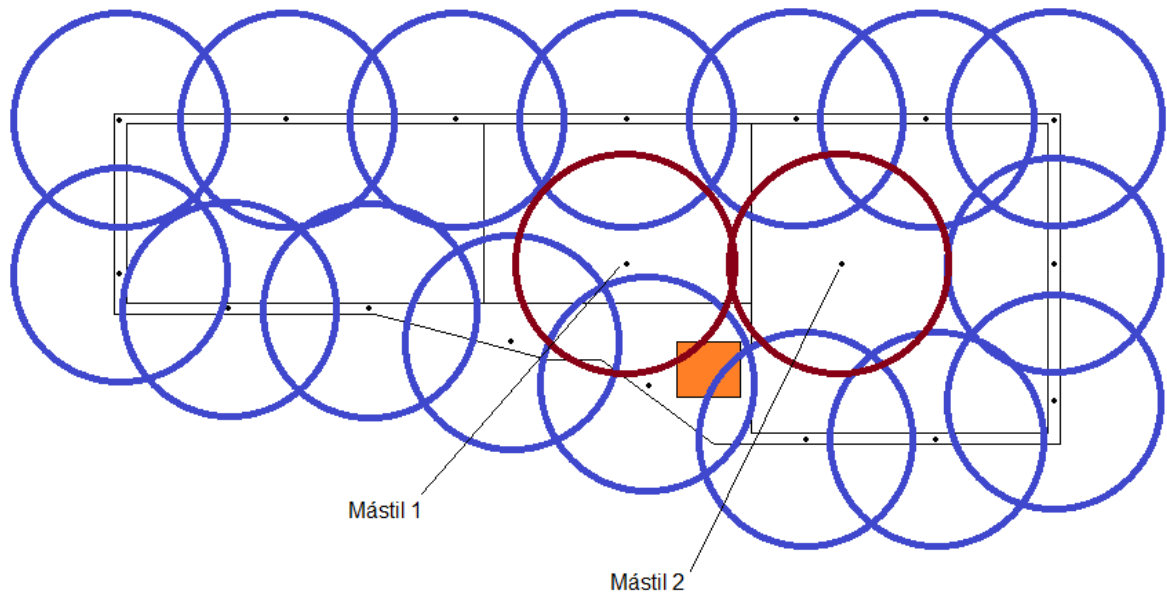


Figura 3.15. Propuesta óptima para el sistema de protección contra descargas atmosféricas.

Como se observa en la figura 3.15, se propone la ubicación de dos mástiles dentro de la zona desprotegida, los cuales garantizarían un aumento de la protección contra descargas atmosféricas en el parque. Los mástiles propuestos se ubican de forma tal que no coinciden con las mesas que contienen los paneles solares, dejando un espacio considerable entre sus respectivas bases y los bordes de los módulos fotovoltaicos ya instalados. Las mediciones exactas para la ubicación se aprecian en la figura 3.16, aunque se puede considerar un pequeño margen de error a la hora de efectuar la ubicación final.

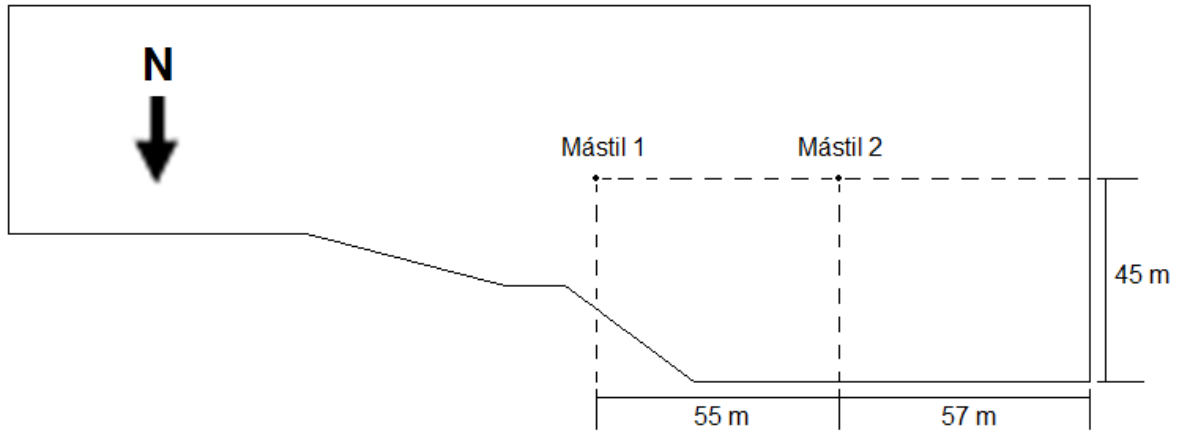


Figura 3.16. Dimensiones para la ubicación de los mástiles.

3.5 Conclusiones del capítulo

Los cálculos realizados con el fin de proponer el sistema de protección contra descargas atmosféricas desde un punto de vista óptimo, cumplen con los parámetros establecidos validados mediante el empleo de software profesionales. Las deficiencias que poseen las protecciones correspondientes instaladas en el parque, no son de gravedad considerable, lo cual implica que para dar solución a las mismas no haya que hacer grandes cambios en el diseño original, más aun, cuando ya se ha construido el parque por completo y se espera su inserción en el sistema en un corto plazo de tiempo; solo se debe proponer a la empresa de proyecto encargada del diseño y construcción de la instalación, considerar los resultados de este trabajo y ponerlos en práctica en el menor tiempo posible para evitar posibles daños a los que está expuesta la misma.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Con la culminación de este trabajo de diploma, se arriban a las siguientes conclusiones:

- ✓ El Parque Fotovoltaico UCLV está ubicado en una zona de peligro potencial debido a la influencia de descargas atmosféricas durante un largo período en el año; la protección en este sentido debe funcionar correctamente ante cualquier eventualidad y garantizar de esta manera, la operación estable del parque conectado al Sistema Electroenergético Nacional.
- ✓ El método de las “Esferas Rodantes” agrupa consideraciones físicas que son de vital importancia a la hora de diseñar protecciones contra descargas atmosféricas de forma óptima, siendo el método que más se aplica con fines prácticos especialmente cuando se proyectan parques fotovoltaicos.
- ✓ El Proyecto Parque Fotovoltaico UCLV solo presenta una deficiencia a la hora de proyectar el sistema de protección contra descargas atmosféricas, no considerando una zona que queda desprotegida ante el impacto directo de rayos.
- ✓ El sistema de puesta a tierra construido en el parque fotovoltaico, reúne los requisitos establecidos para garantizar un correcto funcionamiento del equipamiento conectado a este, sobre todo, ante eventualidades de carácter natural como las tormentas eléctricas. Sus parámetros han sido validados aplicando mediciones reales, coincidiendo perfectamente con los resultados obtenidos en software profesionales.
- ✓ El sistema de protección contra descargas atmosféricas, propuesto de forma óptima, solo requiere para su construcción la inclusión de dos mástiles en una zona desprotegida en el interior del parque, lo cual no implica incurrir en gastos significativos por concepto de materiales y mano de obra para su instalación.

Recomendaciones

- Proponer a la Empresa de Proyecto INEL, encargada del diseño y construcción del parque fotovoltaico, que estime la rápida ubicación de mástiles encima de las luminarias como está establecido en el proyecto; la no consideración de dichos mástiles implica que el parque esté desprotegido casi en su totalidad.
- Proponer a la Empresa de Proyecto INEL, que se instalen los dos mástiles diseñados y ubicados según el resultado de este trabajo, logrando así, un sistema óptimo de protección contra descargas atmosféricas en el parque fotovoltaico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] I. Chávez, "Desarrollo en Cuba de la energía solar fotovoltaica," 2015.
- [2] D. L. Ú. S. M. y. Otros. (2016) Muerte por Fulguración. *Revista Científica Villa Clara* [Artículo especial].
- [3] C. C. GÓMEZ, "Sistema De Energía Solar Fotovoltaica Conectado A Red Para Generación," Grado en Ingeniería Eléctrica, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Carlos III de Madrid, Escuela Politécnica Superior, Madrid 2012.
- [4] J. J. Capitan, "Protección Contra Descargas Atmosféricas y Sistema de Puesta a Tierra de Protección," Informe Técnico Final, Facultad De Ciencias Exactas Físicas Y Naturales Universidad Nacioal de Córdoba, Andina Argentina.
- [5] R. B. Padilla, "Protección de parques fotovoltaicos contra sobretensiones y descargas atmosféricas," Trabajo de Diploma, Departamento de Electroenergética, UCLV, 2016.
- [6] eNGineering. (2010). *Recomendaciones generales para la protección de los sistemas fotovoltaicos aislados contra las descargas atmosféricas*. Disponible en: <http://renewablengineering.blogspot.com>. Consulta: 4 de junio de 2018.
- [7] Á. Valcárcel, "Fundamentos de la protección externa contra rayos," presented at the Conferencia 8, 2010.
- [8] Á. Valcárcel, "Normas para la protección externa contra rayos," presented at the Conferencia 9, 2010.
- [9] M. L. Rivero, "Diseño de un programa para proyectar la protección externa de edificaciones contra descargas atmosféricas," Trabajo de Diploma, Departamento de Electroenergética, UCLV, 2015.
- [10] Y. C. Hernández. and W. S. Santana, "Diseño de Puesta a Tierra en Sistemas Electricos.,"

Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas., Cuba, 2002.

- [11] Á. Valcárcel, "Medición de Resistividad de Suelos," presented at the Conferencia 6, 2015.
- [12] E. d. I. p. I. E. (INEL), "Sistema Eléctrico de Fuerza, Alumbrado, Tierra y Pararrayos," ed. Cienfuegos 2012.
- [13] A. V. y. A. Limonte. (2010) PAST: Programa para el Proyecto y Análisis de Sistemas de Tierra. *Revista Energética*. 49-55.
- [14] CYME, “Programa de análisis de redes eléctricas. Sitio Web: <http://www.cyme.com/es/software/>. Consulta: 28 de mayo de 2018.