



UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS
VERITATE SOLA NOVIS IMPONETUR VIRILISTOGA. 1948

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Electroenergética



TRABAJO DE DIPLOMA

**Protección de Parques Fotovoltaicos contra
sobretensiones y descargas atmosféricas**

Autor: Rubén Barroso Padilla

Tutores: Dr. C. Ángel Cecilio Valcárcel Rojas

Ing. Pedro Luis De Soto Castellón

Santa Clara

2016



Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Electroenergética



Trabajo de Diploma

Protección de Parques Fotovoltaicos contra sobretensiones y descargas atmosféricas.

Autor: Rubén Barroso Padilla

E-mail: rbarroso@uclv.cu

Tutor: *Ing. Pedro Luis De Soto Castellón*

Tutor: Dr. C. Ángel Cecilio Valcárcel Rojas

E-mail: valca@uclv.edu.cu

Santa Clara

2016





Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería Eléctrica , autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Firma del Autor

Firma del Jefe de Departamento
donde se defiende el trabajo

Firma del Responsable de
Información Científico-Técnica

PENSAMIENTO

"Todos somos muy ignorantes. Lo que ocurre es que no todos ignoramos las mismas cosas".

Albert Einstein

DEDICATORIA

A mí preciosa familia

AGRADECIMIENTOS

A toda mi familia en especial a mis padres y hermano por darme ese apoyo incondicional que nunca me ha faltado.

A mis amigos Omar, Pedro y Rosme, Javier, Osleni, por estar siempre ahí cuando los necesité.

A los todos mis compañeros, que no sé que hubiese sido mi universidad sin ellos.

Al ingeniero y amigo Víctor Jara por ayudarme tanto y ser incansable.

A mis tutores Ángel Valcárcel y Pedro Luis.

A Teresita mi eterna directora.

A mis amigos y amigas de Veterinaria y Civil en especial a Yusnavy y Roxana por regalarme unos lindos meses a mi vida.

A todo el que de una forma u otra ha tenido que ver con la realización de este sueño.

A todos muchas gracias

TAREAS TÉCNICAS

1. Evaluación del estado del arte en la protección contra sobretensiones y descargas atmosféricas de instalaciones fotovoltaicas.
2. Determinación del sistema de puesta a tierra más idóneo para las instalaciones fotovoltaicas que se instalan en Cuba.
3. Determinación del sistema de protección contra impactos directos de descargas atmosféricas más adecuados para las condiciones cubanas.
4. Determinación del sistema de protección contra sobretensiones que penetran por el lado de alterna de la Instalación.
5. Comprobación de los resultados obtenidos.

Firma del Autor

Firma del Tutor

Resumen

Las energías renovables son vitales para el desarrollo de un país. La energía renovable más explotada en la isla es la solar. Los parques fotovoltaicos conectados a la red eléctrica nacional son la principal vía de generación eléctrica con la energía procedente del sol. Los mayores enemigos de estas caras instalaciones son las sobretensiones y las descargas atmosféricas que inciden sobre ellas.

En este trabajo se hace una evaluación de la situación existente en dos parques fotovoltaicos de la región central, representativos de los que se construyen en el país, sobre su protección contra sobretensiones provocadas por descargas atmosféricas.

Se pudo comprobar en ambos parques la existencia de una protección adecuada con supresores de sobretensión, pero que no son correspondidas con la protección contra impactos directos de rayo con mastiles ni con las instalaciones de puesta a tierra. Se demuestra que estas dos componentes de la protección no son adecuadas y se propone como debe ser el sistema de puesta a tierra de estas instalaciones y como debe ser protección contra impactos directos de rayo con el uso de mastiles.

Para el diseño de la protección contra impactos directos se desarrolló el programa FOTOPROT, que calcula la cantidad de mastiles necesarios para una protección total y determina su ubicación dentro de la instalación.

TABLA DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN.....	1
El Campo de acción.....	3
Objetivos específicos:.....	3
Organización del informe.....	3
CAPÍTULO 1. CONSIDERACIONES TEÓRICAS SOBRE INSTALACIONES SOLARES Y SU SISTEMA DE PROTECCIÓN.....	5
1.1 Instalaciones solares fotovoltaicas.....	5
1.1.1 Partes fundamentales de los parques fotovoltaicos.....	5
1.2 Descarga atmosférica (rayo).....	6
1.2.1 Breve descripción del fenómeno rayo.....	6
1.3 Principales efectos de un rayo sobre instalaciones fotovoltaicas.....	7
1.4 Sobretensiones eléctricas.....	8
1.4.1 Tipos de sobretensiones.....	9
1.5 Resultado de las sobretensiones y los daños en parques fotovoltaicos.....	12
1.6 Sistema de puesta a tierra en una instalación fotovoltaica.....	13
1.6.1 Objetivos de una puesta a tierra.....	13
1.6.2 Clasificación de las puestas a tierra.....	14
1.6.3. Requisitos de una puesta a tierra.....	15
1.6.4 Factores que pueden incidir en el proyecto de una puesta a tierra.....	17
1.7 Supresores de Sobretensión.....	19
1.7.1 Clasificación de los Supresores de Sobretensión.....	19

1.8 Interruptor seccionador.....	21
1.9 Consideraciones finales del capítulo.....	22
CAPÍTULO 2. ANÁLISIS DEL MONTAJE Y PROTECCIÓN DE LOS PARQUES FOTVOLTAICOS	23
2.1 Proyecto e instalación de los Parques Fotovoltaicos en Cuba.....	23
2.1.1 Sistemas de distribución eléctrica de los Parques Fotovoltaicos.	23
2.2 Análisis del sistema de protecciones contra sobretensiones en los parques.	26
2.2.1 Propagación de las sobretensiones.	26
2.2.2 Sistema de protecciones contra sobretensiones propuesta por INEL	27
2.3 Equipamiento de protección contra sobretensiones y otros desconectivos. .	28
2.3.1 Protección del 3er Escalón: Entrada a Inversores.	28
2.3.2 Protección del 2do Escalón: Tableros Concentradores.....	32
2.3.3 Protección del 1er Escalón: Centro General de Distribución.....	33
2.4 Análisis del sistema de puesta a tierra en los parques.	34
2.4.1 La conexión de la subestación a la malla de tierra.....	36
2.4.2 Los pozos de tierra	36
2.4.3 La equipotencialización	37
2.4.4 Puesta a tierra de las cercas.....	40
2.4.5 Puesta a tierra de la red de datos	42
2.5 Análisis del sistema de protección contra impactos directos de descargas atmosféricas sobre la instalación.	43
2.6 Desarrollo de un software para el diseño de la protección contra impactos directos en instalaciones fotovoltaicas.	45

TABLA DE CONTENIDOS

2.7 Basamento teórico de FOTOPROT.....	48
2.8 Consideraciones finales del capítulo.....	50
Capítulo 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y PROPUESTAS DE SOLUCIONES	51
3.1 Propuesta de malla de tierra para parque fotovoltaico Santa Clara 1MW	52
3.2 Propuesta de protección contra impactos directos de descargas atmosféricas para parque Cantarrana 1MW.....	55
3.3 Consideraciones finales del capítulo.....	59
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	61
Conclusiones	61
Recomendaciones	62
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la sociedad está muy ligado a la disponibilidad energética de la misma. La energía eléctrica, es uno de los principales recursos, necesarios en el proceso de desarrollo y tecnificación, que influye directamente en el aumento de la calidad de vida del hombre principalmente, y del incremento en el proceso de industrialización. Hoy en día se dedican grandes esfuerzos para que las fuentes energéticas sean del tipo renovables y limpias con un freno a los problemas del calentamiento global generado como consecuencia de la contaminación ambiental por los gases de efecto invernadero que provoca la quema de combustibles fósiles y que los yacimientos fósiles son agotables.

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 una manera moderna de generar electricidad durante el día, estos parques pueden ser conectados a la red de distribución de una zona o país capaz de entregar una energía limpia y sin provocar contaminación al medio ambiente.

Cuba da pasos firmes hacia la independencia energética. Por ello se implementa una serie de iniciativas que son una apuesta de futuro en la isla para contrarrestar los problemas que tiene de abastecerse 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 y las expectativas son de cubrir el 10% con fuentes de energía limpias para el año 2020. **[1]**

Las primeras experiencias en Cuba de 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 un programa de electrificación rural, con el objetivo de llevar electricidad a todas las regiones rurales montañosas y de difícil acceso, con la intención de mejorar la calidad de vida de sus habitantes, sobre todo se extendieron las instalaciones en escuelas y centros de salud. La energía solar se ha utilizado en todo el planeta, para este tipo de proyectos, ha demostrado una alta capacidad y adaptación para cubrir las necesidades de estas poblaciones de una forma económica. El uso de fuentes renovables reduce la presión de las comunidades sobre el ecosistema; la deforestación que provoca el uso masivo de la leña y mejora las condiciones de salud evita, el humo de la combustión de leña. Las autoridades hacen grandes esfuerzos en la isla por fomentar el uso de las energías renovables y en la búsqueda de la independencia energética. Cuba tiene un gran recurso solar, por lo que se realizan importantes inversiones en la energía solar. La generación eléctrica a partir de parques fotovoltaicos es un aspecto fundamental para el desarrollo de esta política al utilizar este tipo de energía que aparece en el Programa Nacional de Desarrollo de las Fuentes Nacionales de Energía aprobado en junio de 1993 y en el Programa Nacional de Ciencia y Técnica: “Desarrollo Energético Sostenible” del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (CITMA).[1]

Los parques fotovoltaicos instalados en Cuba han presentado problemas con las sobretensiones que penetran por el lado de corriente alterna, tanto por operación y maniobras en sistema como por descargas atmosféricas, por lo que se llega al siguiente **Problema Científico**: ¿Cómo proteger los Paneles Fotovoltaicos contra sobretensiones y descargas atmosféricas, a partir de los principios de las protecciones eléctricas y la aplicación del sistema de protecciones más adecuados de los parques fotovoltaicos para las condiciones cubanas?

Determinado el problema científico se define como **Objeto:** Sistema de protecciones contra sobretensiones y descargas atmosféricas en parques fotovoltaicos.

El Campo de acción:

En concordancia con lo planteado en el problema y el objeto de estudio se tomó como **Objetivo general de la investigación:** Proponer un sistema idóneo de protecciones contra sobretensiones y descargas atmosféricas en parques fotovoltaicos que se ajuste a la realidad cubana.

Objetivos específicos:

1. Revisar la bibliografía relacionada con el objeto de investigación.
2. Determinar los fundamentos teóricos del funcionamiento de las protecciones contra sobretensiones y descargas atmosféricas.
3. Analizar el sistema de protección contra sobretensiones que penetran por el lado de alterna de la Instalación.
4. Analizar el sistema de puesta a tierra de las instalaciones fotovoltaicas que se analizan.
5. Determinar el sistema de protección contra impactos directos de descargas atmosféricas más adecuados para este tipo de instalaciones.
6. Comprobar los resultados obtenidos mediante la comparación entre la protección existente en las instalaciones y la propuesta.

Organización del informe

El presente trabajo está estructurado de la siguiente manera:

Primer Capítulo: Consideraciones Teóricas sobre Instalaciones Solares y su Sistema de Protección.

Se enuncian los conceptos fundamentales referentes a las instalaciones fotovoltaicas. Los efectos de las sobretensiones y las descargas atmosféricas que pueden incidir sobre las mismas. Se hace referencia a los sistemas de puesta a tierra y a algunos elementos de protección contra sobretensiones.

Segundo Capítulo: ANÁLISIS DEL MONTAJE Y PROTECCIÓN DE LOS PARQUES FOTOVOLTAICOS

Se realiza un análisis profundo sobre la instalación de Parques Fotovoltaicos. Se le presta principal atención al sistema de protección contra sobretensiones; el sistema de puesta a tierra de los parques solares y el sistema de protección contra impactos directos de descargas atmosféricas. Se reconocen las fortalezas y se critican las deficiencias de los sistemas anteriormente mencionados.

Tercer Capítulo: ANÁLISIS DE RESULTADOS Y PROPUESTAS DE SOLUCIONES

Se realiza una propuesta de malla de tierra para el Parque Solar Santa Clara 1 MW que sustituya los anillos utilizados. Se utiliza el software **FOTOPROT** para el cálculo de un sistema de mástiles en el Parque Solar Cantarrana 1MW que proteja el área total de la instalación contra descargas atmosféricas.

CAPÍTULO 1. CONSIDERACIONES TEÓRICAS SOBRE INSTALACIONES SOLARES Y SU SISTEMA DE PROTECCIÓN.

En este capítulo se describen las contribuciones más importantes, reportadas en la literatura referente al objeto de investigación donde se abordan aspectos fundamentales sobre los conceptos o definiciones principales a tener en cuenta al proteger un parque fotovoltaico contra descargas atmosféricas o sobretensiones. Para ello es necesario conocer algunos términos fundamentales con los que se trabaja.

1.1 Instalaciones solares fotovoltaicas.

La conexión de varios módulos nos permite construir lo que hoy en día se conoce por instalaciones solares fotovoltaicas, que en dependencia del tamaño 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.[2]

1.1.1 Partes fundamentales de los parques fotovoltaicos.

Las instalaciones fotovoltaicas se determinan por si se encuentra de forma aisladas para alimentar una carga determinada o conectadas al suministro eléctrico de un país o zona. Aun con distinta disponibilidad no tienen muchas diferencias en cuanto a las partes fundamentales de este tipo de instalaciones. 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.

CAPÍTULO 1. CONSIDERACIONES TEÓRICAS SOBRE INSTALACIONES SOLARES Y SU SISTEMA DE PROTECCIÓN.

- 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, que dependerá del punto de conexión.[2]

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 Descarga atmosférica (rayo).

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 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).

1.2.1 Breve 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

CAPÍTULO 1. CONSIDERACIONES TEÓRICAS SOBRE INSTALACIONES SOLARES Y SU SISTEMA DE PROTECCIÓN.

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.

1.3 Principales efectos de un rayo sobre instalaciones fotovoltaicas

Las descargas atmosféricas tienen su mayor influencia en las instalaciones sobre las estructuras. En ellas se evidencian los fenómenos:

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

- 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.
- 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: el trueno.
- Sobretensiones por conducción tras un impacto en las líneas telefónicas o en las líneas aéreas eléctricas.
- Sobretensiones inducidas por el efecto de radiación electromagnética del canal del rayo que actúa como antena en varios kilómetros.

CAPÍTULO 1. CONSIDERACIONES TEÓRICAS SOBRE INSTALACIONES SOLARES Y SU SISTEMA DE PROTECCIÓN.

- El aumento del potencial de tierra por la circulación de la corriente del rayo por la tierra.[3]

Los efectos eléctricos se traducen en sobretensiones y “efectos de contorno” (condición previa a la ruptura del arco eléctrico), las 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.

Cualesquiera de estos efectos mencionados anteriormente son los causantes de grandes daños en estas instalaciones y principalmente el peligro inminente sobre las personas.

1.4 Sobretensiones eléctricas

La sobretensión es un aumento, por encima de los valores establecidos como máximos, de la tensión eléctrica entre dos puntos de un circuito o instalación eléctrica.

En la mayoría de los casos, pueden causar graves problemas a los equipos conectados a la línea, desde su envejecimiento prematuro hasta incendios o destrucción de los mismos. Los puntos de entrada de las sobretensiones a la instalación pueden ser cualquier conductor metálico. En las instalaciones eléctricas, las líneas de la red de distribución de energía eléctrica y la red de telefonía son las más propensas a sufrir sobretensiones, ya que realizan grandes recorridos aéreos fuera de los edificios, y forman una red de interconexión entre todas las instalaciones.

1.4.1 Tipos de sobretensiones

Es posible organizar las sobretensiones eléctricas en dos grandes grupos según el tiempo de duración de las mismas:

- Sobretensiones permanentes
- Sobretensiones transitorias.

Sobretensiones permanentes

Las sobretensiones permanentes (como se muestra en la Figura 1.1) son aumentos de tensión superior al 10% de la tensión nominal y de duración indeterminada, generalmente debido a la descompensación de las fases, habitualmente causada por la rotura del neutro.

La alimentación de equipos con una tensión superior a aquella para la que han sido diseñados puede generar:

- sobrecalentamiento de los equipos
- reducción de la vida útil
- incendios
- destrucción de los equipos
- interrupción del servicio

CAPÍTULO 1. CONSIDERACIONES TEÓRICAS SOBRE INSTALACIONES SOLARES Y SU SISTEMA DE PROTECCIÓN.

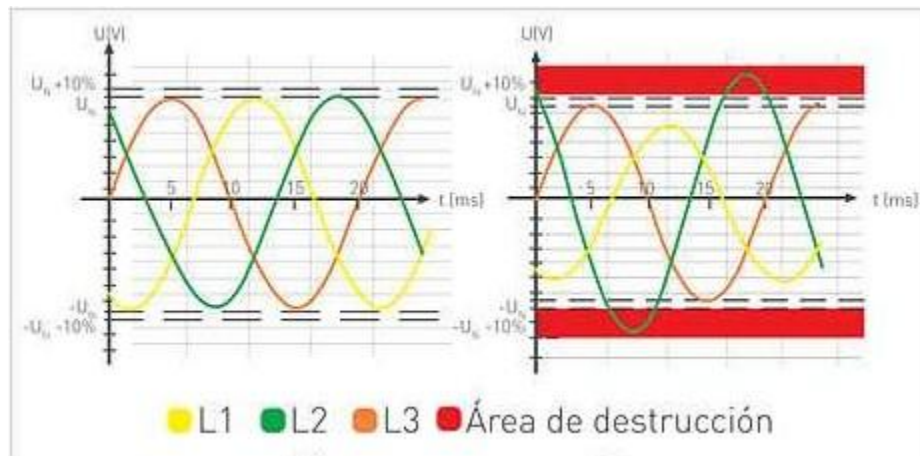


Figura 1.1 Ondas de voltaje de sobretensiones permanentes.

Es por ello que se debe conocer a que potencial deben estar conectados los equipos y cuál es el rango en el que pueden trabajar satisfactoriamente para en dependencia de ello protegerlos contra las sobretensiones a las cuales se pudieran someter.

En esta figura se muestran como se manifiestan las sobretensiones permanentes en

este caso particular ocurre con una sola de las fases pero pueden ser con las tres fases al mismo tiempo en dependencia de que la provoque.

Sobretensiones transitorias

Las sobretensiones transitorias son picos de tensión que pueden alcanzar valores de decenas de kilovoltios y una duración del orden de decenas de microsegundos hasta varios milisegundos; se muestra en la Figura 1.2. Pueden ser originados por el impacto de un rayo u otros fenómenos atmosféricos (la principal causa) o por conmutaciones en la red.

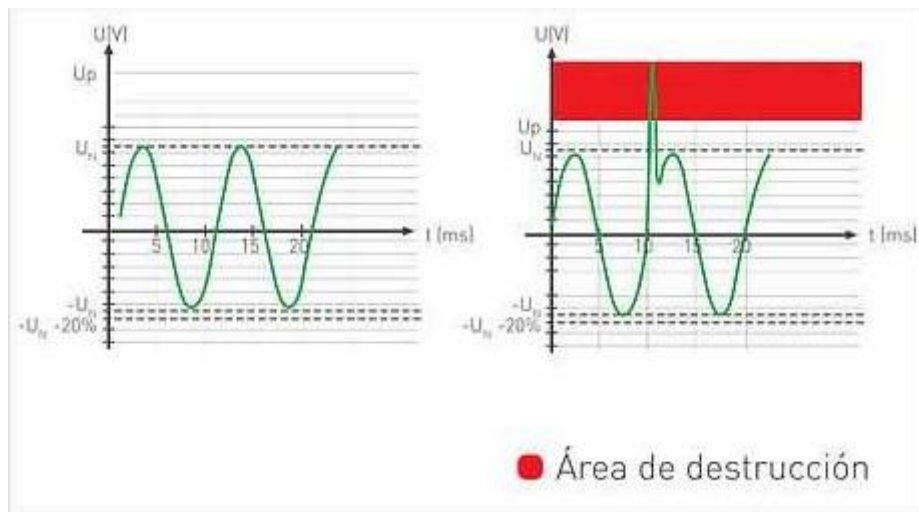


Figura 1.2. Onda de voltaje de sobretensiones transitorias.

La figura 1.2 muestra como se distorsiona la onda de voltaje en un corto período de tiempo, es importante destacar que el pico de tensión aunque de corta duración puede alcanzar valores muy altos. Estas sobretensiones pueden causar la destrucción de los equipos conectados a la red y además la interrupción del servicio. Las sobretensiones producidas por fenómenos atmosféricos llegan hasta la instalación de tres formas fundamentales:

Sobretensión conducida: El rayo puede caer directamente en las líneas aéreas propagándose la onda escarpada de voltaje a lo largo de varios kilómetros. Llega al consumidor y se deriva a tierra a través de sus equipos produciéndoles averías o su total destrucción.

Sobretensión inducida: La radiación emitida por el impacto del rayo sobre un objeto (poste, árbol, pararrayos u otros) próxima a la línea eléctrica o de transmisión de datos, induce corrientes transitorias en éstas, transmitiéndolas al interior de las instalaciones. Ello puede provocar averías o destrucción de los

equipos conectados a estas líneas. Vea las sobretensiones por inducción electromagnética.

Sobretensiones producidas por inducción electromagnética: Las descargas atmosféricas, aun cuando se producen alejadas de las instalaciones, e incluso las descargas entre nubes, pueden producir sobretensiones inducidos electromagnéticamente con efectos significativos. Estas descargas se comportan como un emisor de radiaciones electromagnéticas cuyo espectro se extiende desde muy baja frecuencia hasta los 1000 MHz y es causa de perturbaciones a las transmisiones radioeléctricas. Por otra parte, las descargas atmosféricas ocasionan una amplitud máxima al campo eléctrico que puede alcanzar 300 V/cm/kA a 30 m de distancia. Si el valor de este campo sobrepasa el gradiente disruptivo del aire (3–5 kV/cm), ocurrirá un arco de ruptura, por ejemplo: entre dos conductores, uno referido a tierra y el otro aislado.

1.5 Resultado de las sobretensiones y los daños en parques fotovoltaicos

Los daños en el sistema eléctrico y/o el equipamiento electrónico de un parque fotovoltaico debido a las sobretensiones pueden ser originado por los impulsos electromagnéticos de un rayo o por determinados tipos de operaciones en el sistema, tales como fallas, apertura o cierre de interruptores, fenómenos de resonancia, etc. Las sobretensiones por impulsos electromagnéticos de un rayo son las que ocurren con mayor frecuencia en los parques fotovoltaicos.

La caída de un rayo sobre un parque fotovoltaico no sólo puede causar la rotura de sus sistemas electrónicos y eléctricos, sino que también puede provocar daños físicos a las personas.

Este fenómeno ocasiona pérdidas de todo tipo:

- La pérdida de vida humana.
- La pérdida de servicio para el público.

CAPÍTULO 1. CONSIDERACIONES TEÓRICAS SOBRE INSTALACIONES SOLARES Y SU SISTEMA DE PROTECCIÓN.

- La pérdida de patrimonio cultural.
- La pérdida de valor económico.

Con respecto al origen, el daño debido al rayo puede estar clasificado por:

- Impacto directo de rayo sobre el parque fotovoltaico.
- Impacto del rayo en las cercanías del parque fotovoltaico.
- Impacto del rayo sobre los servicios conectados al parque.
- Impacto del rayo en la vecindad de los servicios conectados al parque.[4]

Es necesario tener en cuenta los daños ocasionados incluso cuando el rayo cae fuera de la instalación ya que estos pueden generar grandes costos por roturas de componentes eléctricos y electrónicos; ello depende en gran medida de los sistemas de protección y de un buen sistema de puesta a tierra.

1.6 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 está muy en concordancia con el esquema de puesta a tierra que tengamos previsto implantar en la instalación.

Podemos decir 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 tierra y otros elementos metálicos que se encuentran sobre una instalación, sobre el terreno o en el terreno mismo.[5]

1.6.1 Objetivos de una puesta a tierra

Los objetivos perseguidos al realizar una 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

CAPÍTULO 1. CONSIDERACIONES TEÓRICAS SOBRE INSTALACIONES SOLARES Y SU SISTEMA DE PROTECCIÓN.

comportamiento técnicamente adecuado del sistema eléctrico de la instalación. Ambos objetivos conjuntamente determinaran las características y su dimensionamiento.

Desde el punto de vista del comportamiento técnico de un sistema eléctrico, una puesta a tierra cumple diversas funciones, según sea el caso, son exclusivas o tienen prioridad, las mismas son.

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.[5]

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

1.6.2 Clasificación de las puestas a tierra

A las puestas a tierras que tienen 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; entendiéndose 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.

CAPÍTULO 1. CONSIDERACIONES TEÓRICAS SOBRE INSTALACIONES SOLARES Y SU SISTEMA DE PROTECCIÓN.

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 poder y medición, divisores capacitivos, etc.), se denominan puesta de tierra de operación o puesta de tierra de servicio.

1.6.3. Requisitos de una puesta a tierra

En consideración de los objetivos de una puesta a tierra, se debe requerir de estas determinadas características o requisitos. Estos requisitos se dividen en dos categorías **Requisitos de proyecto** y **Requisitos de diseño**.

1.6.3.1 Requisitos de proyecto

Los requisitos normales de proyecto de una puesta a tierra o sistema de puesta a tierra, son:

La puesta a tierra o sistema deberá tener, como máximo, un determinado valor de resistencia establecido.

La puesta a tierra o sistema deberá tener, como máximo, un determinado valor de impedancia a impulso establecido.

La 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, y realizar las acciones necesarias para disminuir estos riesgos de daños a un mínimo, y considerar aspectos de costo / beneficio.

CAPÍTULO 1. CONSIDERACIONES TEÓRICAS SOBRE INSTALACIONES SOLARES Y SU SISTEMA DE PROTECCIÓN.

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

1.6.3.2 Requisitos de diseño

Los requisitos de diseño de una puesta a tierra dependen de las características particulares de estas y de las condiciones del medio en que se encuentra. Los requisitos normalmente considerados son:

- 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 tanto a los elementos (electrodos) que forman la puesta a tierra propiamente tal, como a los elementos de unión entre la puesta a tierra, y los equipos y estructuras (cables de unión, prensas, conectores, etc.).
- 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 usaran en las puestas a tierra, materiales que puedan producir corrosión galvánica de importancia en otros elementos metálicos enterrados. Ejemplos de elementos que pueden ser afectados son 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.

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

Anteriormente fueron establecidos los requisitos normales de proyecto de una puesta a tierra que está determinado en gran medida por los siguientes factores, que son propios de cada instalación particular [5]:

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

1.6.4.1 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. Considerar que la resistividad influye proporcionalmente en las características de una puesta a tierra, y que esta puede variar dentro de rangos muy amplios, es necesario un conocimiento 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 también aproximadamente homogénea.

1.6.4.2 Resistividad superficial del terreno

Los valores tolerables de voltaje entre pies y entre mano y 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 Ω -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 y ambos pies son 188 y 134 V respectivamente, durante 1 seg. Si se usa un material artificial de resistividad 1.000 Ω -m, en un espesor de 0.15 m, estos valores aumentan estos valores aumentan a 610, a 239 V.

1.6.4.3 Dimensiones de una puesta a tierra

Cuando se proyecta una puesta a tierra, por ejemplo, para una central, subestación, complejo industrial, un parque fotovoltaico u otra instalación relacionada con el sistema de alta tensión, se plantea a esta habitualmente dos requerimientos: un valor máximo de resistencia, que no debe sobrepasarse, y la condición de garantizar la seguridad de las personas y equipos.

El valor de la resistencia de una puesta a tierra, para una misma constitución del terreno, depende en gran medida de su dimensión principal. Para los electrodos elementales: barra y conductor horizontal, esta dimensión principal es su longitud, que influye en medida 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

1.6.4.4 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.

1.7 Supresores de Sobretensión

Las instalaciones fotovoltaicas que se caracterizan por ocupar extensas superficies están especialmente expuestas a las descargas atmosféricas y las consiguientes sobretensiones transitorias. Las consecuencias de estas sobretensiones son la reducción del rendimiento y la vida de la instalación. El uso de protecciones contra sobretensiones garantiza la optimización del rendimiento de la instalación y en consecuencia se muestra como una decisión altamente rentable. Los protectores de sobretensión descargan a tierra los picos de tensión transitorios que se transmiten a través de los cables de la instalación eléctrica.

1.7.1 Clasificación de los Supresores de Sobretensión

Las protecciones contra sobretensiones de tipo atmosférico pueden ser de dos clases:

- **CLASE I:** Los protectores contra sobretensiones de Clase I (ver Figura 1.5) están destinados a ser instalados en las extremidades de las líneas exteriores de una instalación fotovoltaica para protegerla contra impactos directos de rayos. Este tipo de protección no se utilizará en esta instalación al no ocupar mucho terreno y tratarse de una zona de bajo riesgo de impacto directo por un rayo.



Figura 1.5. Protección contra sobretensiones Clase I.

- CLASE II: Las protecciones de Clase II (ver Figura 1.6) se destinan a la protección de las redes de alimentación fotovoltaica contra las sobretensiones transitorias debidas a descargas atmosféricas indirectas que se producen a una determinada distancia de la instalación fotovoltaica e inducen una sobretensión.



Figura 1.6. Protección contra sobretensiones Clase II.

Para la elección de la protección contra sobretensiones a utilizar en la instalación, se tendrá en cuenta la tensión máxima de funcionamiento que puede producirse en el generador fotovoltaico para escoger un descargador que soporte dicha tensión.[6]

1.8 Interruptor seccionador

Los interruptores de continua que se instalarán en este tramo de la instalación, tendrán la función de aislar zonas del generador para labores de mantenimiento de los módulos solares como limpieza y reparación de incidencias.

Para la elección de los interruptores-seccionadores (ver la Figura 1.7) se tendrán en cuenta dos parámetros, la tensión de servicio de la línea y la corriente que deben ser capaces de interrumpir al abrirse. Para esta instalación dichos parámetros vendrán dados por la corriente de cortocircuito que pueda producirse en cada panel por el número de ramales que conecta el interruptor-seccionador y la tensión máxima de servicio será la tensión máxima que puede darse en la instalación.

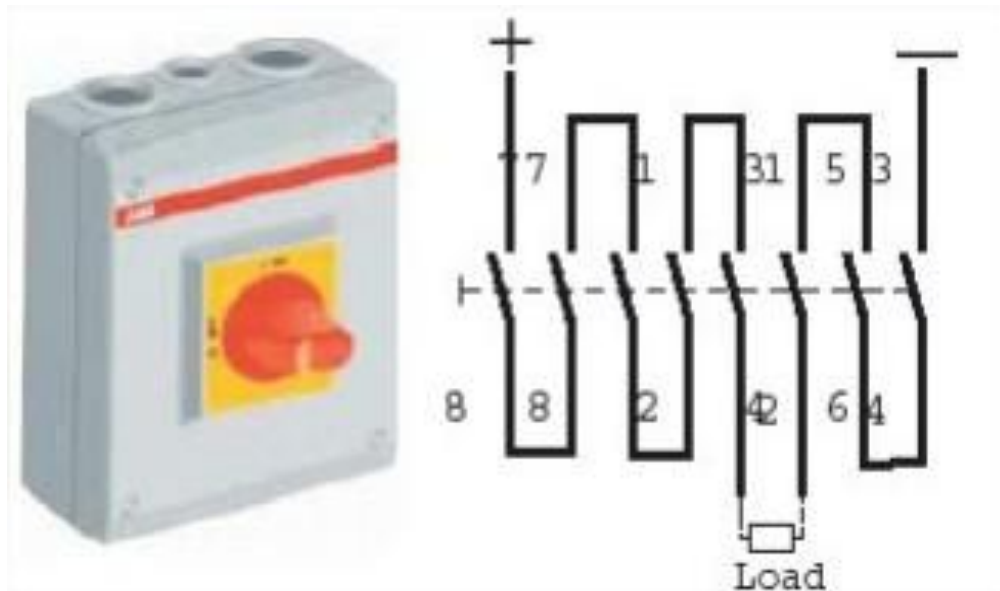


Figura 1.7. Interruptor Seccionador.

En dependencia de la tensión de servicio a la cual va a trabajar el interruptor, se utilizará un número de polos determinado, es decir, cuanto mayor sea la tensión

CAPÍTULO 1. CONSIDERACIONES TEÓRICAS SOBRE INSTALACIONES SOLARES Y SU SISTEMA DE PROTECCIÓN.

de servicio de la instalación, se deberán aumentar el número de interrupciones de corriente y, por consiguiente, el número de polos conectados en serie. [6]

1.9 Consideraciones finales del capítulo

Era necesario el conocimiento de algunos términos con los cual se debe trabajar en el desarrollo de este proyecto, es por ello que en este capítulo se dedicaron importantes líneas a explicar algunos términos como; lo relacionado a las descargas atmosféricas, los efectos de los rayos y como pueden afectar directamente e indirectamente a los parques fotovoltaicos; que se determina como sobretensiones y como afectan a los paneles solares; la necesidad de un sistema de protecciones para parque fotovoltaicos contra descargas atmosféricas y sobretensiones; el papel que juega el sistema de puesta a tierra en las instalaciones fotovoltaicas y cuáles son los aspectos a tener en cuenta para la realización de un eficiente sistema de puesta a tierra en instalaciones de este tipo; se hace alusión a términos como descargadores a tierra e interruptores seccionadores tan necesarios en sistemas de protecciones en instalaciones con características similares a los parques fotovoltaicos.

CAPÍTULO 2. ANÁLISIS DEL MONTAJE Y PROTECCIÓN DE LOS PARQUES FOTOVOLTAICOS

La instalación de un parque fotovoltaico es de un alto costo monetario para cualquier estado del mundo, los componentes tanto eléctrico como electrónicos dígase el grupo de paneles, así como los inversores o la subestación necesaria para la conexión con el sistema de potencia de un país, son de un gran valor. El sistema de protecciones de un parque fotovoltaico es el que garantiza el buen funcionamiento del mismo y protege sus partes fundamentales lo que aumenta su vida útil, también brinda protección al personal que trabaja en la instalación, minimiza los riesgos ante cualquier falla u otro fenómeno no deseado. Los mayores peligros a los que está sometido un parque solar son en primer lugar las descargas atmosféricas las cuales lo afectan de disímiles maneras y en segundo lugar las sobretensiones que pueda recibir la instalación por la acción de una descarga atmosférica o por variación del sistema de potencia al cual se encuentra conectado.

2.1 Proyecto e instalación de los Parques Fotovoltaicos en Cuba

En Cuba el proyecto de diseño y cálculo de los parques está a cargo de la Empresa de Ingeniería para la Electricidad (INEL) por el cual la empresa de Hidroenergía se encarga del montaje y puesta en marcha del mismo. Los cursos de nivelación para operarios son confeccionados e impartidos por Hidroenergía de esta forma se proporciona el conocimiento necesario para la manipulación correcta de la instalación aspecto de primer orden en cuanto a protección se trata.

2.1.1 Sistemas de distribución eléctrica de los Parques Fotovoltaicos

Se emplean como base normativa las normas siguientes:

CAPÍTULO 2. ANÁLISIS DEL MONTAJE Y PROTECCIÓN DE LOS PARQUES FOTOVOLTAICOS

- NC 800-1 Código Electrotécnico Cubano. Parte 1 Baja Tensión.
- IEEE Std 80-2000 Guide for Safetyin 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 envolvente.

Se utilizan paneles solares con las siguientes características; ensamblado en Cuba con componentes de China con una potencia nominal de 185 W, los valores de voltaje y corriente nominales son 24 VCD y 7,7 A respectivamente. Los inversores que se encuentran instalados son de origen alemán de la marca SMA tipo SUNNY TRIPOWER de una potencia de 17 000 W con una relación de voltajes de 600 VCD, 400 VCA como se muestra en la figura 2.1.



Figura 2.1. Inversor SMA de 17kW.

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.

2.2 Análisis del sistema de protecciones contra sobretensiones en los parques.

El sistema de protección contra sobretensiones debe ser uno de los pilares de la protección y la seguridad de los Parques Fotovoltaicos. Es necesario contar con un sistema fiable ante este fenómeno tan dañino capaz de afectar tanto los componentes eléctricos como electrónicos de la instalación. Sin medida de protección eficaz contra sobretensiones hay que calcular altos costos para reparación o nueva adquisición de los dispositivos afectados. De esta manera es comprensible que las medidas de protección para evitar destrucciones debidas a sobretensiones resulten interesantes para el campo industrial o profesional. Un concepto de protección eficaz contra sobretensiones abarca los campos de la alimentación de corriente, instalaciones telefónicas, instalaciones de antenas, instalaciones de recepción así como la técnica de procesamiento de datos y de mando. Es importante que todos los conductores que están conectados en un aparato se conecten con un descargador de sobretensiones apropiado. En consideración del valor total a proteger, la instalación de aparatos de protección adecuados se amortiza por regla general, al evitar tan solo una vez la destrucción de una instalación electrotécnica o de un aparato. Los aparatos de protección contra sobretensiones actúan múltiples veces, siempre que los parámetros de potencia no sean sobrepasados, de manera que el usuario obtiene un aprovechamiento esencialmente superior.

2.2.1 Propagación de las sobretensiones.

Acoplamiento galvánico: por medio de las impedancias comunes se acoplan sobretensiones galvánicamente desde una lugar hacia otro. Las altas amplitudes de corrientes de rayo causan una sobretensión a través de la resistencia de tierra de una conexión equipotencial entre dos aparatos conectados. En los conductores que pasa una corriente de rayo se genera adicionalmente una sobretensión, que a

CAPÍTULO 2. ANÁLISIS DEL MONTAJE Y PROTECCIÓN DE LOS PARQUES FOTOVOLTAICOS

causa de la gran velocidad de aumento de corriente se puede atribuir, según la ley $U_L = L \cdot di/dt$, esencialmente a la componente inductiva.

Acoplamiento inductivo: el acoplamiento inductivo en una línea tiene lugar a través del campo magnético según el principio del transformador. Una sobretensión provoca una corriente transitoria en un conductor con una alta velocidad de aumento de la di/dt . Al mismo tiempo, alrededor de este conductor se genera un campo magnético (función del primario de un transformador). En conductores aledaños que se encuentran en la zona activa del campo magnético, se induce una sobretensión (función del secundario de un transformador).

Acoplamiento capacitivo: el acoplamiento capacitivo tiene lugar, en principio, a través del campo eléctrico entre dos puntos con gran diferencia de potencial. Una parte o un aparato eléctricamente conductor [A] es puesto a un alto potencial debido a la descarga de un rayo, por ejemplo la barra colectora de un pararrayos. Se genera un campo eléctrico entre [A] y otras partes con potencial inferior [B], por ejemplo una línea de alimentación o de transmisión de señales dentro de la caseta. La tensión entre [A] y [B] tiende a igualarse lo que conduce al transporte de una carga. Esto aporta un ascenso de tensión en la línea afectada [B] y en el aparato conectado a esta. [6]

2.2.2 Sistema de protecciones contra sobretensiones propuesta por INEL

Los parques fotoeléctricos cubanos diseñados por la Empresa de Ingeniería para la Electricidad (INEL) adoptan el siguiente sistema. La protección contra sobretensiones de la red de energía de baja tensión, se hará en los siguientes puntos:

1er Escalón: Centro General de Distribución

2do Escalón: Tableros Concentradores

3er Escalón: Entrada a Inversores.

CAPÍTULO 2. ANÁLISIS DEL MONTAJE Y PROTECCIÓN DE LOS PARQUES FOTOVOLTAICOS

Todos los puertos de equipos que sean alambrados con cables de cobre llevarán supresores de sobretensión seleccionados de acuerdo a la configuración del puerto y nivel de tensión de empleo. Su referencia de tierra será única. Las protecciones de los puertos de comunicaciones de los inversores, cableados con cable STP, se pedirán con el correspondiente proyecto de control y comunicaciones. Debido al uso de cable de cobre STP para las comunicaciones en redes exteriores la malla de tierra tendrá un ancho de cuadrícula inferior a los 10 m. La pantalla de estos conductores se pondrá a tierra cada 15 m como máximo. La terminación de esta conexión retendrá la entrada del agua en las redes soterradas.

2.3 Equipamiento de protección contra sobretensiones y otros desconectivos.

Se debe tener en cuenta los escalones de protección mencionados en el epígrafe anterior y de esta manera describiremos el equipamiento utilizado a los distintos niveles de complejidad; de lo simple a lo complejo.

2.3.1 Protección del 3er Escalón: Entrada a Inversores.

Este nivel se encuentra protegido por el descargador de sobretensiones DEHNguard... CI de la familia Red/Line (ver en la figura 2.2), es una simbiosis perfecta para la protección contra cortocircuitos y contra sobretensiones, en un solo módulo de protección. El circuito de protección con el fusible de protección integrado en el descargador y los potentes varistores de óxido de zinc, en combinación con el dispositivo Thermo-Dynamic-Control, ofrecen grandes beneficios gracias a su sencilla instalación y por sus mínimas exigencias de espacio. El usuario tiene la posibilidad de disponer, en muy poco espacio, de una protección contra sobretensiones con una corriente de cortocircuito de hasta 25 kAeff, que cumple con todas las normativas de instalación. Se cumplen también

CAPÍTULO 2. ANÁLISIS DEL MONTAJE Y PROTECCIÓN DE LOS PARQUES FOTOVOLTAICOS

las exigencias de señalización de estado para todos los circuitos, también para el circuito N-PE según normativa IEC 60364-5-53.

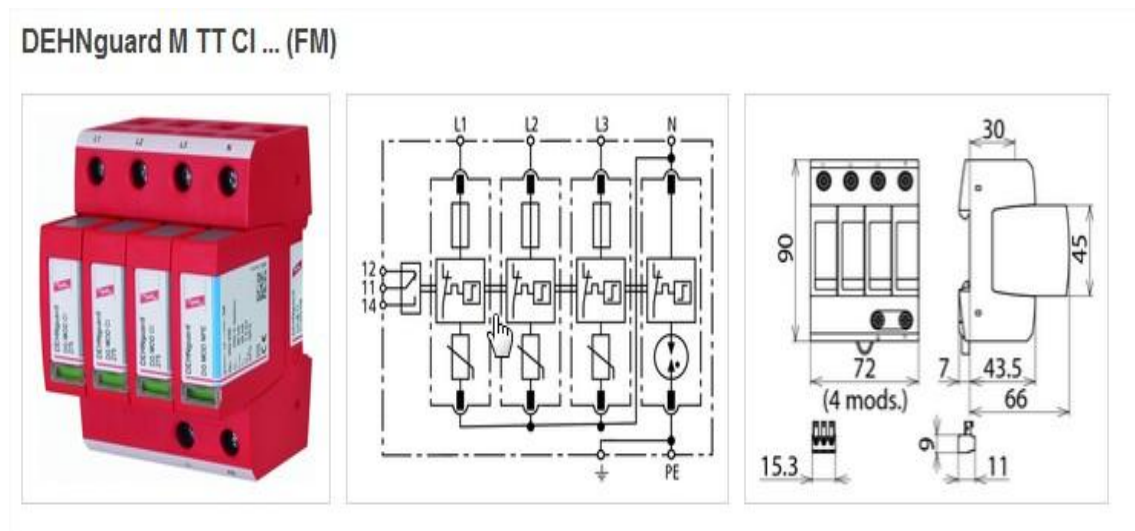


Figura 2.2. Descargador de sobretensiones.

En la figura anterior se muestra el descargador de sobretensiones DEHNguard con sistemas TT- y TN-S con fusible integrado con tensión nominal de 230 / 400 V (circuito "3+1"); en la versión FM con contacto de señalización a distancia (contacto conmutado libre de potencial).[7]

Se utiliza también el **BLITZDUCTOR** (ver la figura 2.3) es una familia de supresores de alta densidad montados en carril DIN y se compone de diferentes tipos de encapsulados con métodos de conexión diferentes. Cada dispositivo no solo protege y balancea la señal de cuatro hilos con acoplamientos por tornillo, sino que también protege equipamiento con terminal de sistemas de telecomunicación así como también sistemas telefónicos con conexión RJ. Todos

CAPÍTULO 2. ANÁLISIS DEL MONTAJE Y PROTECCIÓN DE LOS PARQUES FOTOVOLTAICOS

los tipos pueden ser montados en carriles DIN y es conectado a tierra por un terminal atornillado.

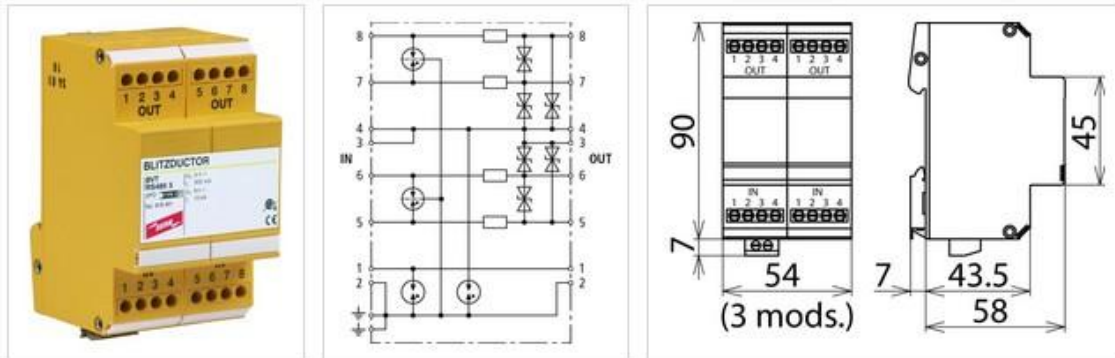


Figura 2.3. BLITZDUCTOR VT four-wire RS485/422.

En la figura 2.3 se muestra un supresor de sobretensiones **BLITZDUCTOR VT** del tipo RS485/422 four-wire con sensor de temperatura y protección directa o indirecta conectado a tierra, conexión de una señal a tierra (SG).[8]

Otro nivel de protección utilizado es el interruptor seccionador mencionado en el capítulo 1. A continuación le mostramos en la figura 2.4 ejemplos muy particulares utilizados en algunos parques.



Figura 2.4. Interruptor Seccionador.

La figura anterior muestra un interruptor seccionador de tres vías + neutro este es el encargado de aislar el inversor para mantenimientos u otras actividades. Este cuenta con contactores magnéticos los cuales tiene la capacidad de actuar ante alguna posible falla.

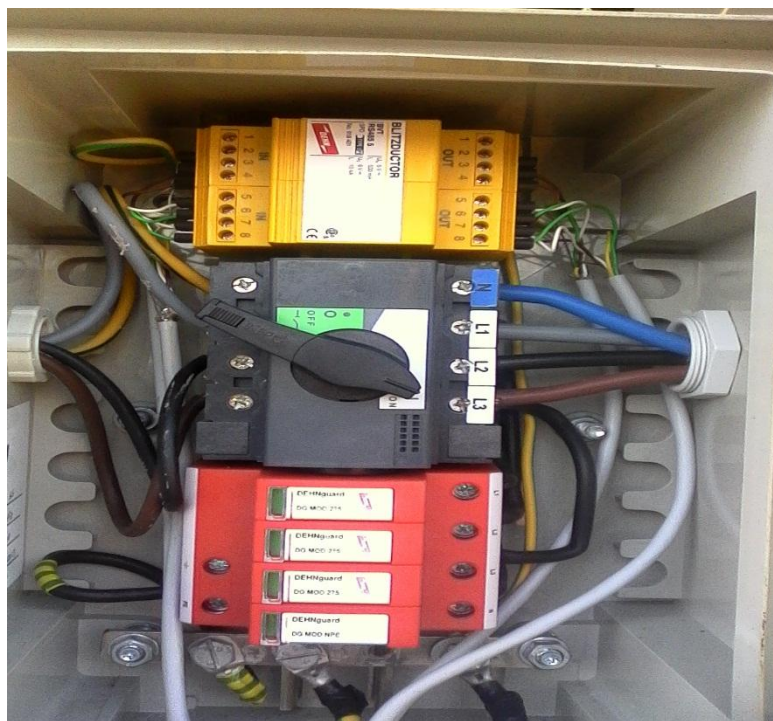


Figura 2.5. Caja de registro de interruptor y protecciones en la entrada del inversor.

Los elementos mencionados en este 3er escalón de protección se encuentran montados en una caja de registro de termoplástico, como se muestra en la figura 2.5, el cual evita algún posible incendio que pudiera ocasionar la falla.

Se puede apreciar en la imagen anterior como queda montado el equipamiento de protección sobre la caja de material termoplástico y la interconexión de los

CAPÍTULO 2. ANÁLISIS DEL MONTAJE Y PROTECCIÓN DE LOS PARQUES FOTOVOLTAICOS

elementos de protección de tierra a la barra de tierra interconectada con el neutro del sistema.

2.3.2 Protección del 2do Escalón: Tableros Concentradores

En este escalón se protegen las líneas que llegan de los grupos de inversores así como los inversores propiamente dichos. Para ello se utilizan los descargadores de sobretensión DEHNguard... CI de la familia Red/Line mencionados anteriormente. Junto a los descargadores de sobretensiones se utilizan con función protectora los disyuntores magnetotérmicos de la marca **Schneider Electric** los cuales son dispositivos capaces de interrumpir la corriente eléctrica de un circuito cuando esta sobrepasa ciertos valores máximos. Su funcionamiento se basa en dos de los efectos producidos por la circulación de corriente eléctrica en un circuito: el magnético y el térmico (efecto Joule). El dispositivo consta, por tanto, de dos partes, un electroimán y una lámina bimetálica, conectadas en serie y por las que circula la corriente que va hacia la carga. En la siguiente figura 2.6 se muestra el mecanismo detallado de un disyuntor magnetotérmico.

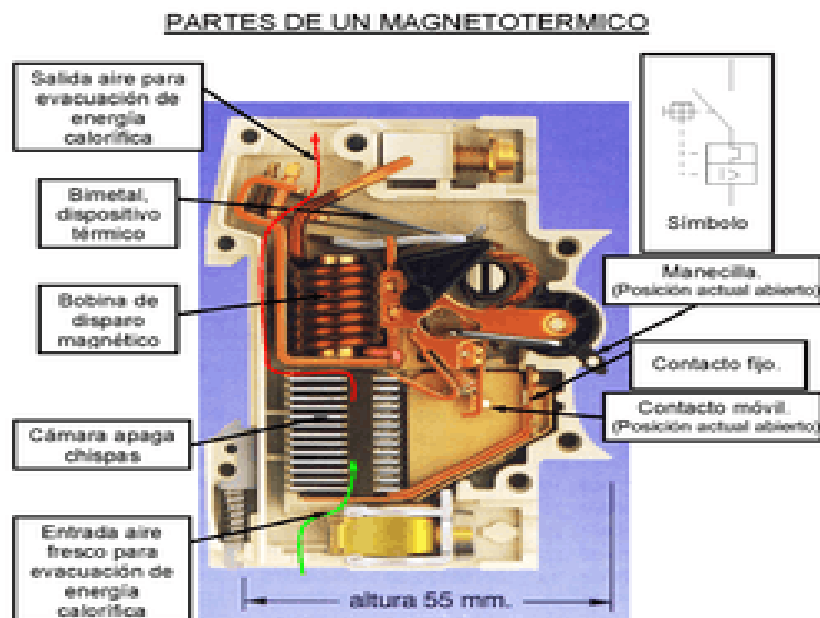


Figura 2.6. Partes de un Magnetotérmico.

Se utilizara un módulo de disyuntores para cada inversor de esta manera se conectarán y desconectarán de forma independiente. Por otra parte se colocará un interruptor seccionador general, como el mostrado anteriormente, para cada Tablero Concentrador de esta manera se desconectan el grupo de inversores en una sola acción.

2.3.3 Protección del 1er Escalón: Centro General de Distribución

El Centro General de Distribución es el punto de mayor complejidad de la instalación ya que es el punto de enlace de la instalación con la subestación y esta con el Sistema Electroenergético Nacional (SEN). El Centro General de Distribución de baja tensión de 3 polos más neutro, más tierra, con las barras confinadas en compartimento metálico segregado del resto de las unidades funcionales, está compuesto por:

Un interruptor totalizador de 2000 A, 4 polos y curvas LSIG. Capacidad mínima de cortocircuito 25 kA a 400 V; interruptores de 250 A, relé electrónico con curvas LSIG de 3 polos más neutro; interruptores automáticos de 16 A, 3 polos. Un interruptor de 16 A, que alimenta un transformador seco, monofásico de 2,5 kVA y otro interruptor de 16 A en el circuito secundario del transformador. El transformador tendrá una tensión primaria de 400 V, 2 polos y una tensión secundaria de 240/120 V, dos polos más neutro. Dos interruptores tripolares de 63 A. Uno de reserva y el otro para alimentar un supresor combinado de sobretensiones tetrapolar de $U_c=275$ V y una corriente nominal por polo de 50 kA
.[9]

El sistema de protecciones del centro general tiene características similares a los demás escalones, cuenta con descargadores de sobretensiones DEHNguard... CI

CAPÍTULO 2. ANÁLISIS DEL MONTAJE Y PROTECCIÓN DE LOS PARQUES FOTOVOLTAICOS

de la familia Red/Line; con disyuntores magnetotérmicos, interruptores seccionadores para cada grupo de tableros concentradores de esta manera se pueden aislar entre sí. El sistema de control es a cargo de módulos PLC de la marca **Schneider Electric** los cuales cuentan con los módulos de protección específicos para el PLC, destacar que todo cuenta con tecnología de punta.

2.4 Análisis del sistema de puesta a tierra en los parques.

Según el proyecto, para la ejecución de la malla de tierra se excavarán las zanjas a una profundidad de 0,8 m en forma dos anillos uno interno por dentro del cercado perimetral y otro externo a aproximadamente 2 metros por fuera del cercado perimetral, estos anillos se interconectarán entre sí en múltiples puntos lo más equidistantes posible, dentro de la instalación se extenderá el electrodo horizontal hasta los extremos de las hileras de mesas que soportan los paneles; la zanja realizada para el paso de este electrodo horizontal queda diseñada de la siguiente forma, ver figura 2.7

CAPÍTULO 2. ANÁLISIS DEL MONTAJE Y PROTECCIÓN DE LOS PARQUES FOTOVOLTAICOS

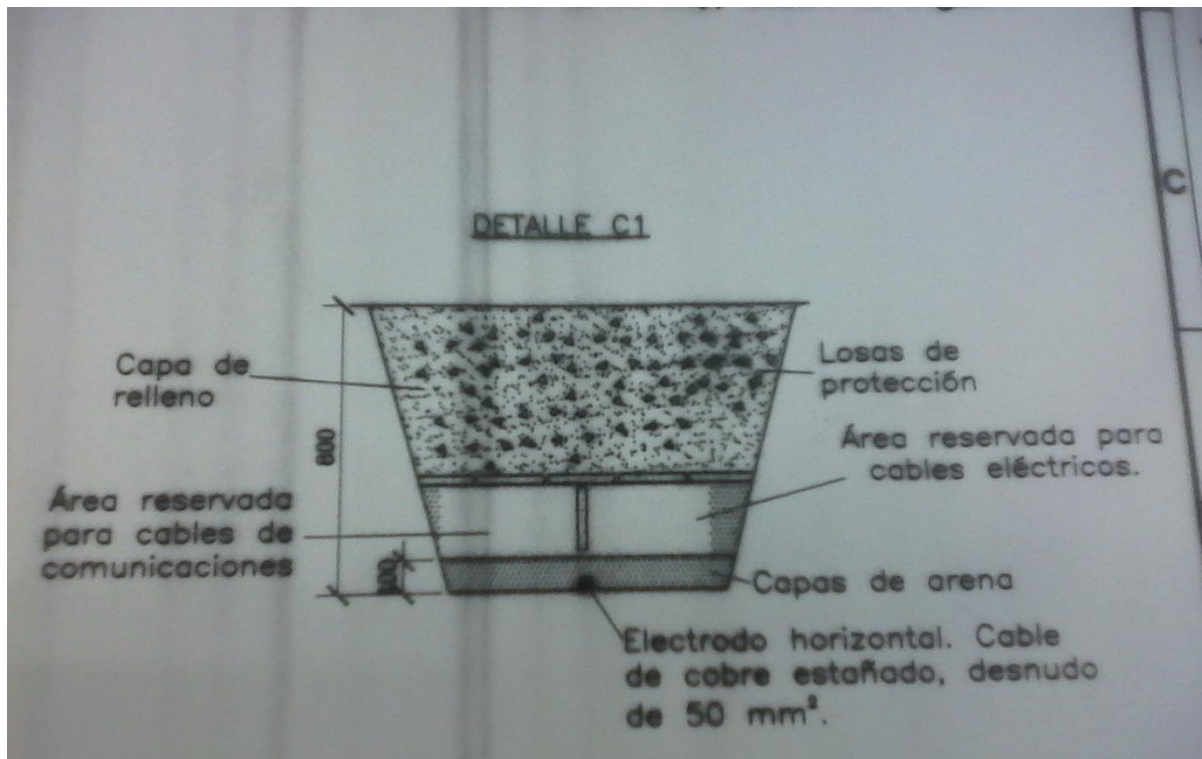


Figura 2.7. Ilustración de la zanja por donde pasa el electrodo horizontal.

La imagen anterior muestra la estructura de la zanja realizada para el aterramiento del electrodo horizontal. Se debe destacar que las áreas destinadas a los cables eléctricos y de comunicación se encuentran expuestas a los potenciales que podrían ser ocasionados por el drenaje de un rayo u otro tipo de falla ya que solo se encuentran a menos de 10 cm de separación del electrodo horizontal, además el electrodo de tierra encuentra se propone rodeado de arena material no idóneo para estas instalaciones. Esto podría provocar altos valores de resistencia de puesta a tierra, lo cual representará un alto peligro para la instalación.

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.[9]

2.4.1 La 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 de la 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.

2.4.2 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 emplearan los conectores GP 6429 como indica la figura 2.8. 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.

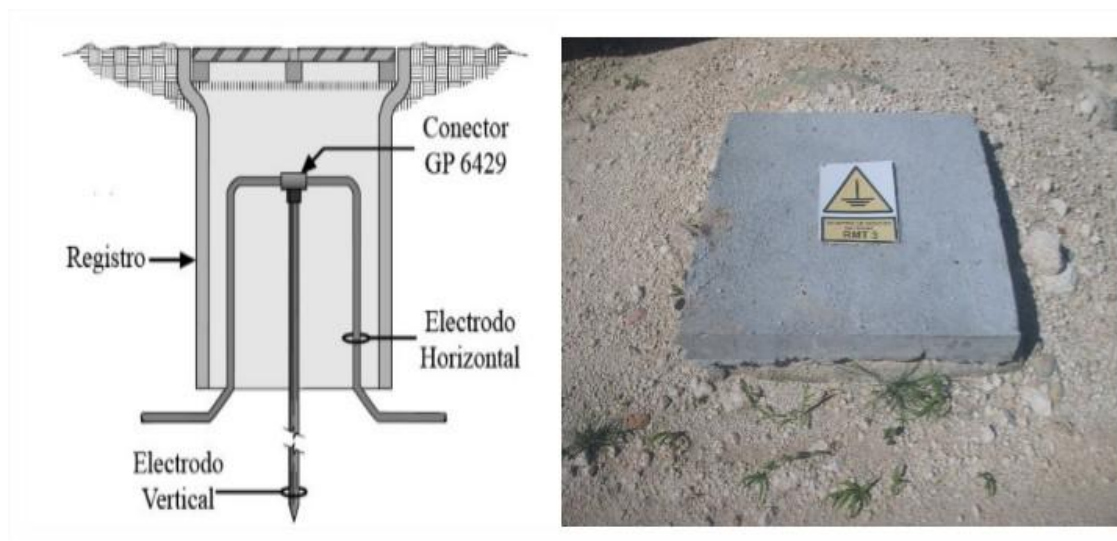


Figura 2.18. Detalles de los pozos de tierra.

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.

2.4.3 La equipotencialización

Será sumamente importante la equipotencialización de las mesas que soportan los paneles solares con la estructura adyacente, tal y como indica la figura 2.9 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.

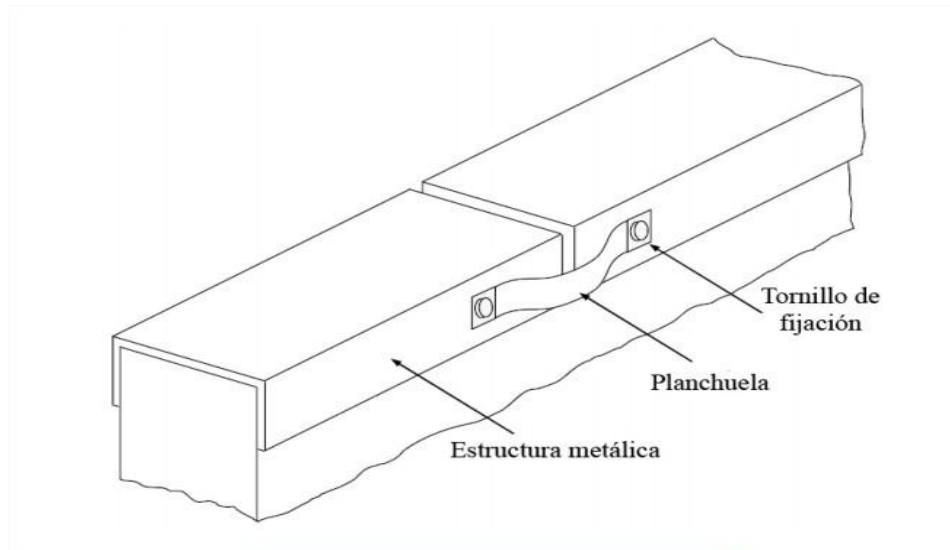


Figura 2.9. Medios de equipotencialización de los tableros.

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 2.10, de esta manera quedan interconectados todos los tableros con la malla de tierra. La unión se realizara 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.



Figura 2.10. 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 2.11.

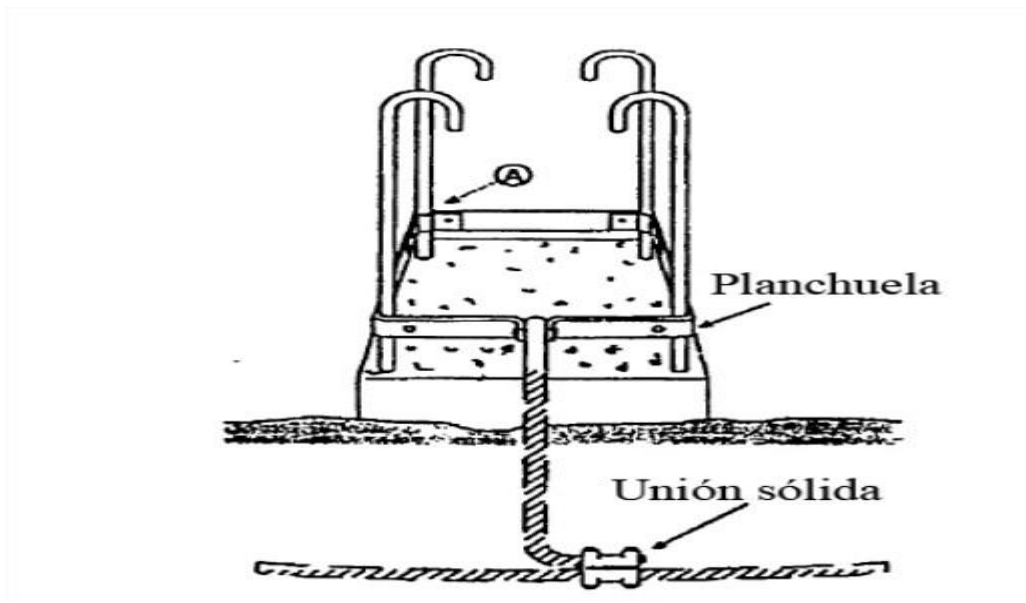


Figura 2.11. Equipotencialización del acero estructural con la malla de tierra.

2.4.4 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 2.12. 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 2.13). Dos metales bien equipotencializados poseerán un valor de continuidad eléctrica del orden de los $m\Omega$.

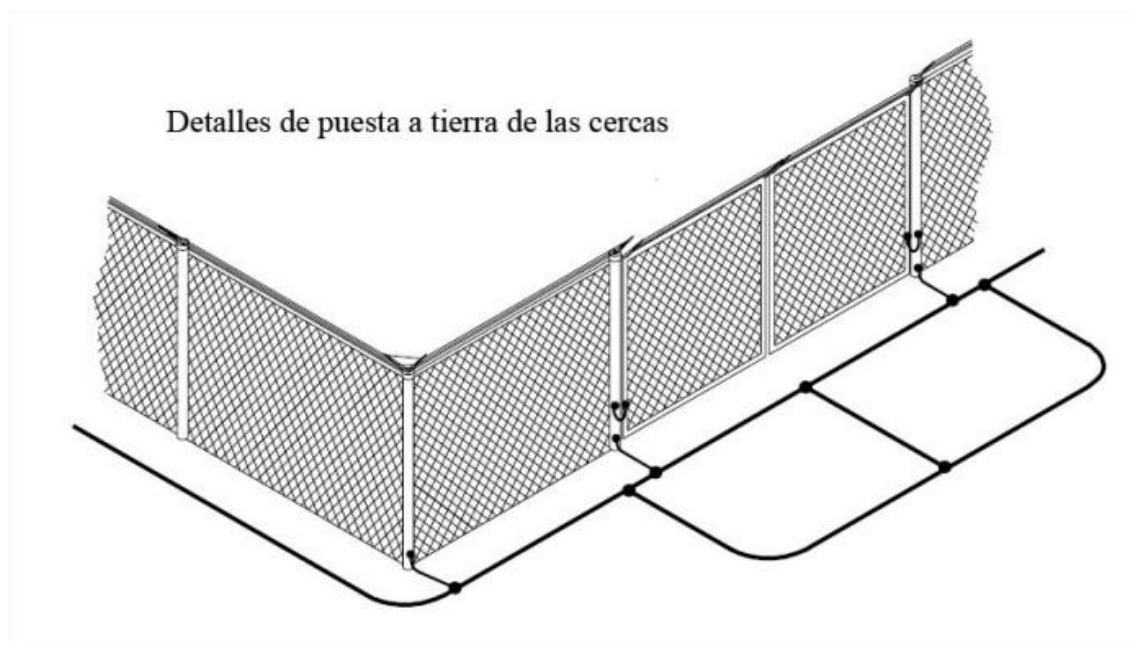


Figura 2.12. Extensión de la malla de tierra por fuera de la cerca y conexión con esta.

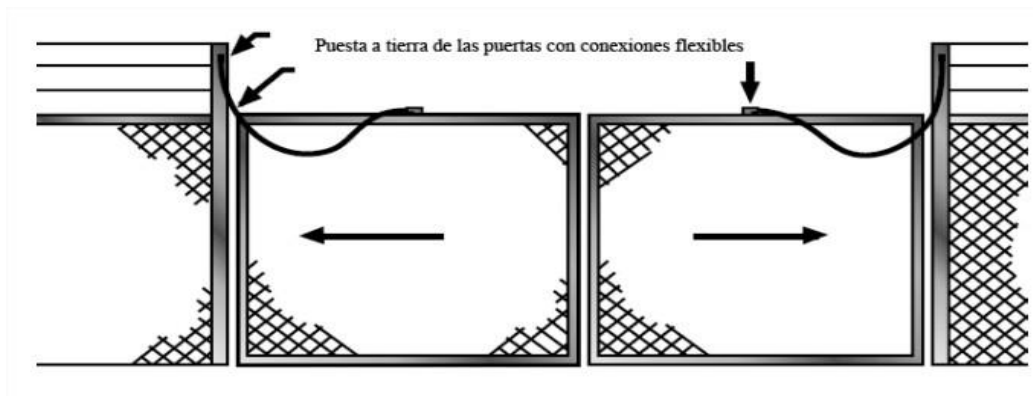


Figura 2.13. Conexiones flexibles a tierra de partes móviles.

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.

2.4.5 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 2.14 se muestra uno de los medios para ello.

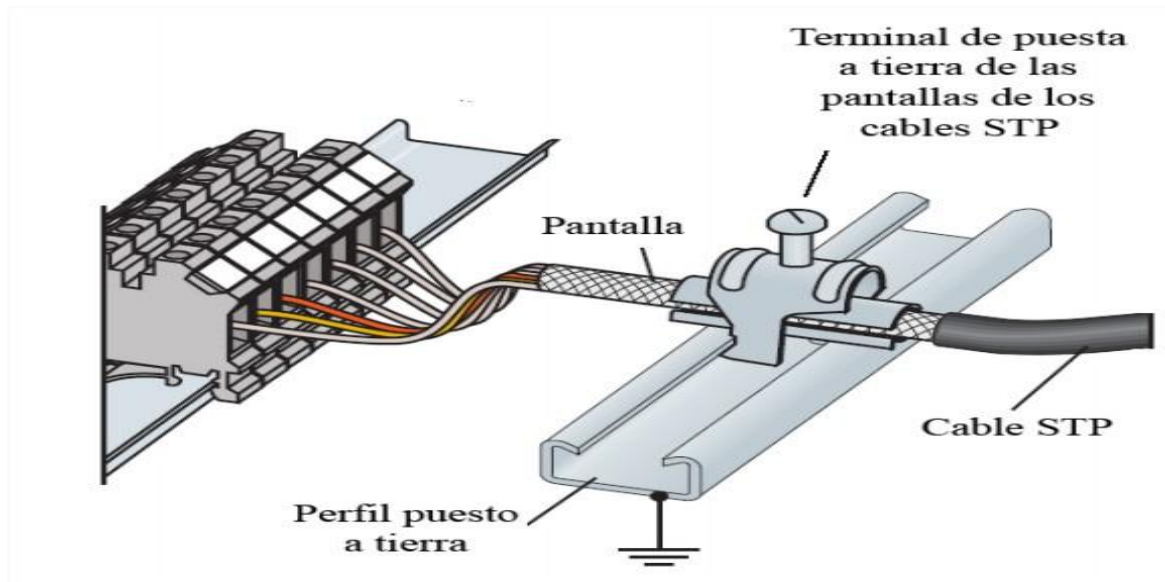


Figura 2.14. Puesta a tierra de la pantalla de los cables sensibles a perturbaciones.

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 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.[9]

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

2.5 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 indispensables para la protección de la instalación. En los diseños realizados y en instalaciones en funcionamiento el nivel de protección contra las descargas directas sobre el parque no es el óptimo. 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 70mm² que lo equipotencializará con la malla de tierra, el brazo de la luminaria también se conectará al cable protector (se muestra en la figura 2.15). La punta Franklin se elevará unos 300 milímetros sobre el poste.

CAPÍTULO 2. ANÁLISIS DEL MONTAJE Y PROTECCIÓN DE LOS PARQUES FOTOVOLTAICOS

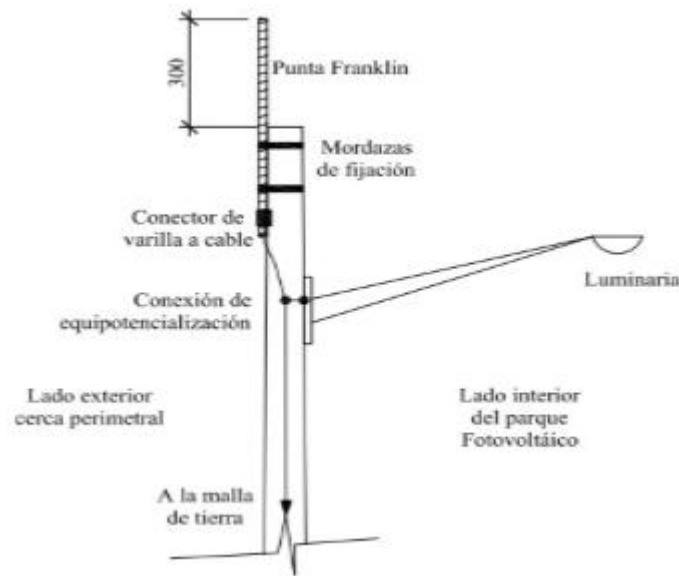


Figura 2.15. Poste de alumbrado con punta Franklin.

Estas puntas Franklin se encuentran también como protección de las casetas y la subestación, en algunos casos sobre la azoteas como muestra la figura 2.16 y en otros casos sobre postes de hormigón destinados a esto.



Figura 2.16. Vista de pararrayos sobre caseta de subestación.

En la imagen anterior se puede apreciar cómo quedan montados los pararrayos sobre la casetas de las subestaciones con una elevación de aproximadamente 1.5 metros sobre el nivel del techo de la caseta.

Debido a la gran extensión de área necesaria para la generación fotovoltaica; por ejemplo el parque solar de Cantarrana en la provincia de Cienfuegos consta con un área aproximada de 60000m²; no es suficiente con la colocación de pararrayos solo en casetas o en los postes de alumbrado 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.

2.6 Desarrollo de un software para el diseño de la protección contra impactos directos en instalaciones fotovoltaicas.

La necesidad de una solución para la problemática planteada anteriormente por la ausencia de protección, contra impacto directo de un rayo en parques fotovoltaicos dio paso a la creación del software FOTOPROT. Este software consiste en una aplicación de interfaz gráfica (ver figura 2.17) 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 un protección total, así como su ubicación dentro de la de la instalación, como salida del programa se puede tener una gráfica de la posición de los mástiles y sus respectivas áreas de protección.

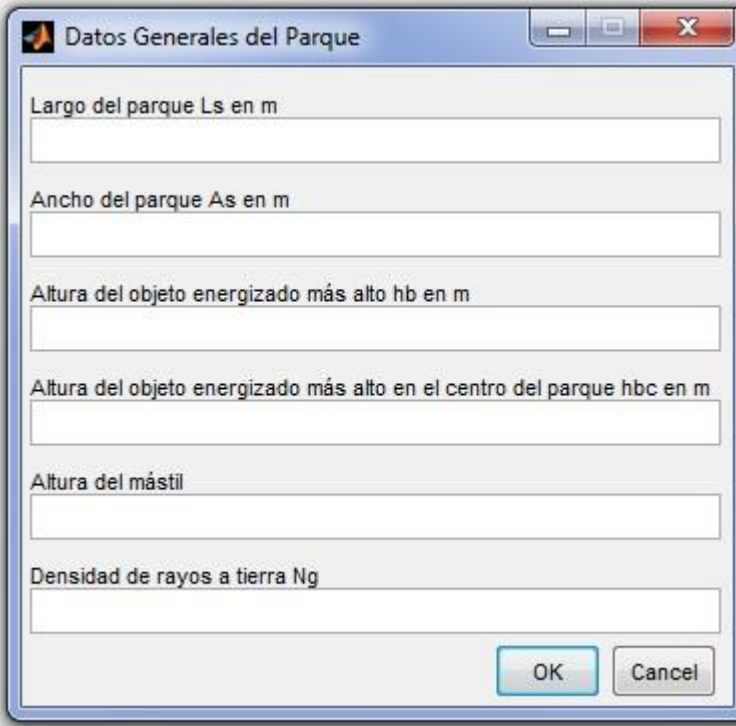
CAPÍTULO 2. ANÁLISIS DEL MONTAJE Y PROTECCIÓN DE LOS PARQUES FOTOVOLTAICOS



Figura 2.17. Aplicación gráfica FOTOPROT.

Como se muestra en la figura 2.17 FOTOPROT cuenta con tres menús fundamentales **Datos**, **Calcular**, **Resultados**.

En el primer menú cuenta con tres submenús **Insertar Datos** (ver figura 2.18), **Cargar Datos** y **Guardar Datos** para el manejo de los datos de los estudios realizados.



Datos Generales del Parque

Largo del parque L_s en m

Ancho del parque A_s en m

Altura del objeto energizado más alto h_b en m

Altura del objeto energizado más alto en el centro del parque h_{bc} en m

Altura del mástil

Densidad de rayos a tierra N_g

OK Cancel

Figura 2.18. Datos Generales del Parque.

La figura 2.18 Datos Generales del Parque, se obtiene al entrar en el submenú **Insertar Datos** 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 con atención a la ubicación de los mástiles en el área del parque para una protección total del área de la instalación.

2.7 Basamento teórico de FOTOPROT

FOTOPROT se basa en el Modelo electrogeométrico el cual plantea que la distancia de impacto de un rayo (distancia sobre la cual la guía escalonada es atraída para impactar un objetivo) es proporcional a la densidad de carga de esta guía escalonada. Además, la corriente en la siguiente descarga de retorno es proporcional a la densidad de carga de la guía precedente, la corriente de retorno es un parámetro medible.

Cuando la protección se lleva a cabo por mástil simple, el área de atracción será un segmento de esfera por encima del área de atracción de la tierra como muestra la figura 2.19, en este caso ocurrirá un impacto si la descarga atraviesa este segmento de esfera.

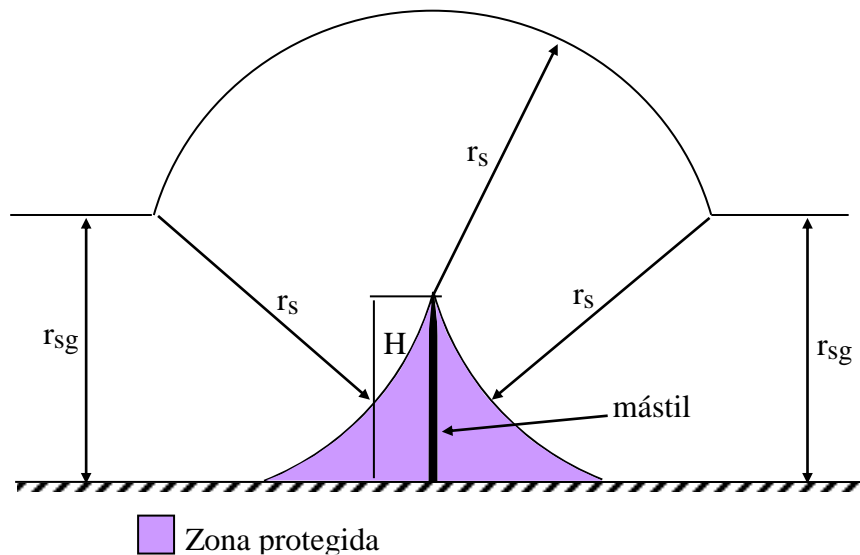


Figura 2.19. Área de atracción y zona de protección de un mástil simple.

CAPÍTULO 2. ANÁLISIS DEL MONTAJE Y PROTECCIÓN DE LOS PARQUES FOTOVOLTAICOS

Cuando se desea proteger un área rectangular con un ancho A_s y una longitud L_s con mástiles verticales, tal y como se muestra en la figura 2.20, se usan filas de mástiles de manera que cubran el área a proteger.

Para este caso el ancho entre dos filas de mástiles A_m es igual al ancho de las estructuras de las barras activas más dos veces la mínima distancia entre las partes activas y los objetos aterrados; o sea $A_s + 2 S_b$ y L_m es la distancia entre dos mástiles adyacentes de una misma fila. En la Figura siguiente se usan cuatro mástiles para proteger el área.

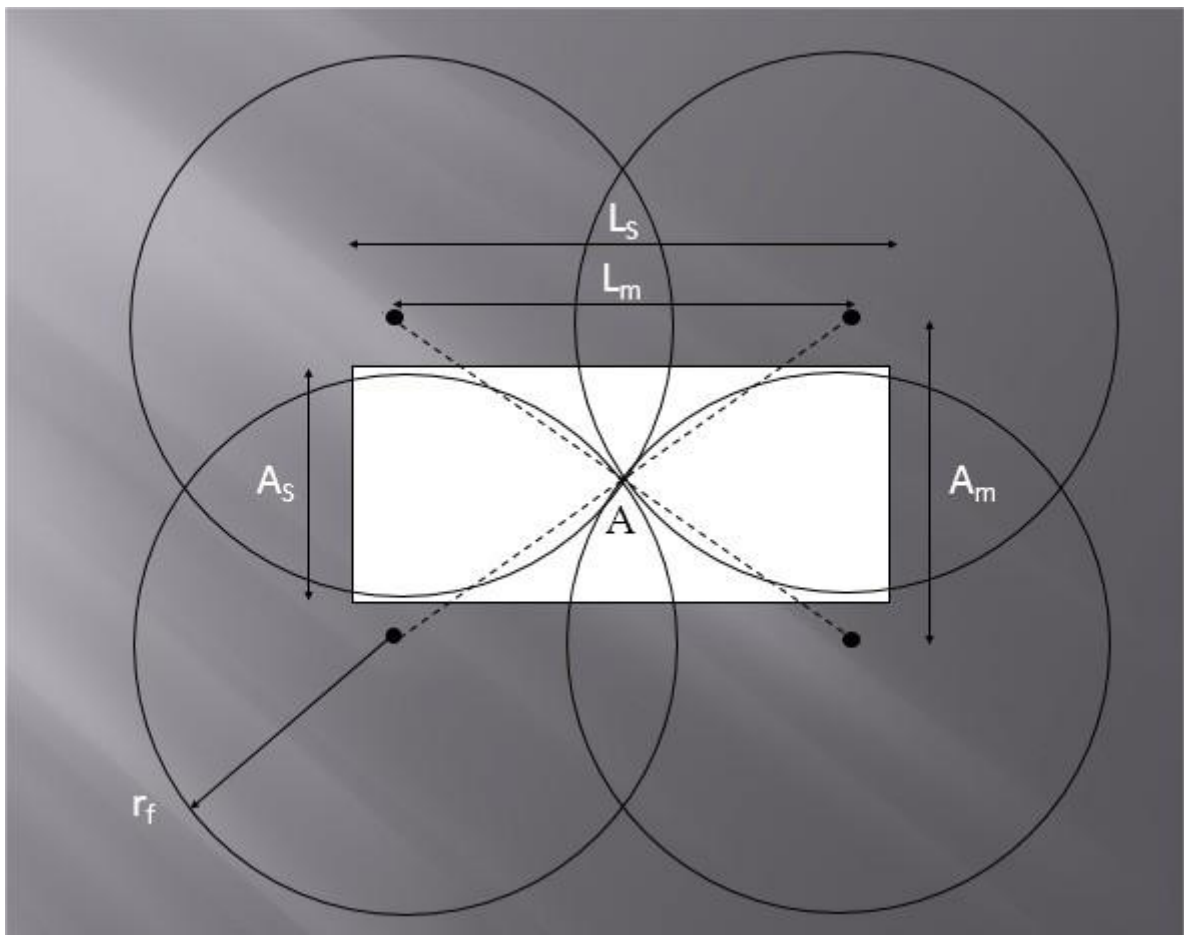


Figura 2.20. Área rectangular protegida por cuatro mástiles.

CAPÍTULO 2. ANÁLISIS DEL MONTAJE Y PROTECCIÓN DE LOS PARQUES FOTOVOLTAICOS

Para una protección completa del rectángulo ($L_s A_s$), las esferas deben cubrir toda el área, en otras palabras, los círculos de radio r_f se deben solapar sin dejar espacio entre ellos. Sin embargo esta no es la única condición que se debe cumplir para una protección total. La sección debajo del punto A en la figura, donde se interceptan las dos diagonales, es el punto más alejado de los mástiles dentro del área a proteger y este punto de intercepción es el más cercano al plano de tierra, por lo que la altura del área de atracción brindada por el mástil en ese punto A debe ser mayor que el área de atracción del plano de la tierra r_{sg} [10]

2.8 Consideraciones finales del capítulo

Un sistema de protecciones contra descargas atmosféricas y sobretensiones de un Parque Fotovoltaico no es sencillo de diseñar es por ello que en este capítulo se analizó detalladamente el sistema protecciones contra sobretensiones; el sistema de puesta a tierra y el sistema de protección contra impactos directos de descargas atmosféricas sobre la instalación fotovoltaica. Todo ello se realizó a partir del Proyecto de instalación de Parques Fotovoltaicos en Cuba desarrollados por la Empresa de Ingeniería para la Electricidad (INEL). En este profundo análisis se destacan grandes fortalezas como el equipamiento utilizado para la protección contra sobretensiones tanto para los componentes eléctricos y electrónicos como para sistemas de comunicaciones y telefónicos, todo de última tecnología la mayoría de las firmas DEHN y Schneider Electric empresas líderes en este mercado. Se detectaron algunas debilidades referentes a la protección contra de impactos directos por la ausencia de algún tipo de punta captadora pararrayo, y los sistemas de puesta a tierra que no es el óptimo para estas instalaciones y se desarrolló de un software FOTOPROT para el diseño de la protección contra impactos directos en instalaciones fotovoltaicas

Capítulo 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y PROPUESTAS DE SOLUCIONES

En este trabajo se evaluaron dos parques fotovoltaicos de la región central del país, Santa Clara 1 MW y Cantarrana 1 MW, de las provincias de Villa Clara y Cienfuegos respectivamente.

A partir del análisis realizado en el capítulo anterior, en estos dos parques se detectaron algunos puntos débiles en el diseño del sistema de protección contra impacto directo de descargas atmosféricas y el diseño de las mallas de tierra. Para dar solución a estos problemas se propone un sistema de malla de tierra para el Parque Fotovoltaico de Santa Clara realizado y analizado por el software PAST y se diseñó un sistema de mástiles para el Parque Fotovoltaico Cantarrana con el software FOTOPROT.

3.1 Propuesta de malla de tierra para parque fotovoltaico Santa Clara 1MW

El sistema de puesta a tierra de este parque está constituido por dos anillos de electrodos horizontales interconectados entre si y a los cuales se conectan las estructuras metálicas de donde se montan los paneles. La figura 3.1 muestra en color azul la distribución de los conductores del sistema de puesta a tierra del parque.

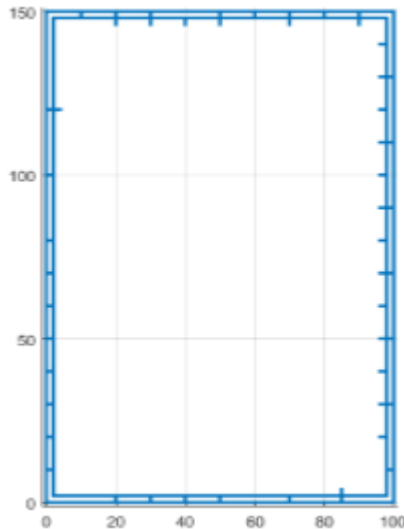


Figura 3.1. Malla de tierra del Parque Fotovoltaico de Santa Clara 1MW.

Como se observa los dos anillos se extienden alrededor del parque con una separación de apenas dos metros entre ellos, y los pequeños salientes corresponden con la extensión de estos electrodos hasta la estructura de montaje de los paneles solares.

Para evaluar el comportamiento de este sistema ante descargas atmosféricas, se modeló en el PAST el impacto de una descarga de 10 kA en la esquina inferior izquierda del sistema y se obtuvieron los niveles de voltaje que se muestran en la figura 3.2 para las esquinas inferior y superior izquierda del sistema.

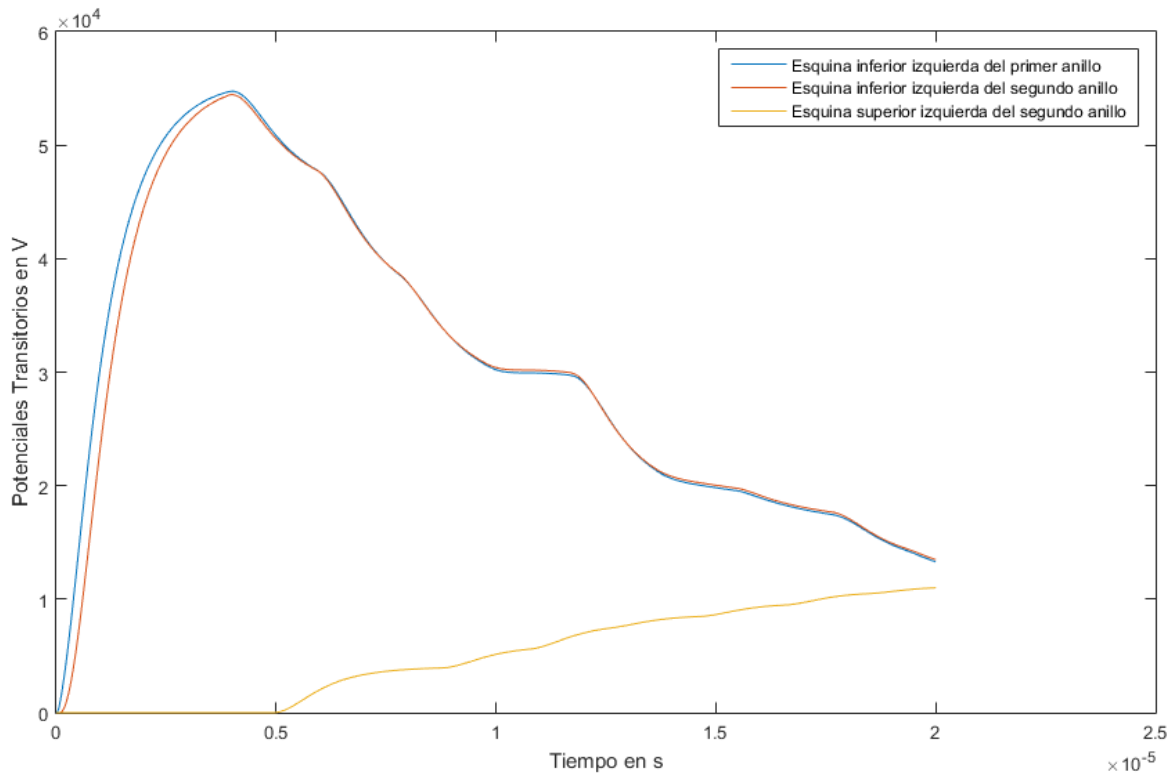


Figura 3.2. Grafica de Potenciales Transitorios causados por una descarga eléctrica en el Parque Fotovoltaico.

Se puede apreciar que los niveles de tensión en la esquina inferior superan los 50 kV y en la esquina superior alejada 150 metros del punto de impacto la tensión supera los 10 kV, valores ambos suficientes para hacer fallar el equipamiento.

Con un diseño en forma de malla (figura 3.3), que puede llegar de forma más directa a todos los paneles del parque, si se modela un impacto de rayo en la esquina inferior izquierda, con las misma características que el anterior, los niveles de voltaje que se generan en los nodos numerados de la figura 3.3, se muestran en la figura 3.4.

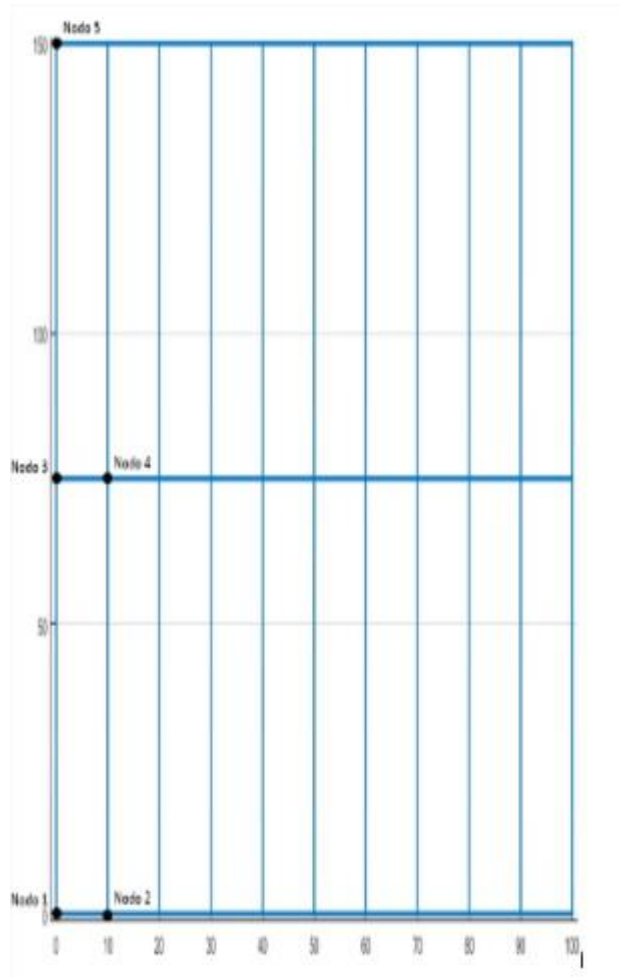


Figura 3.3. Configuración de la malla de tierra propuesta para el Parque Fotovoltaico Santa Clara 1 MW.

Al analizar esta configuración se observan notables cambios en cuanto a los valores de los potenciales transitorios (ver figura 3.4) al colocar una descarga en el nodo 1.

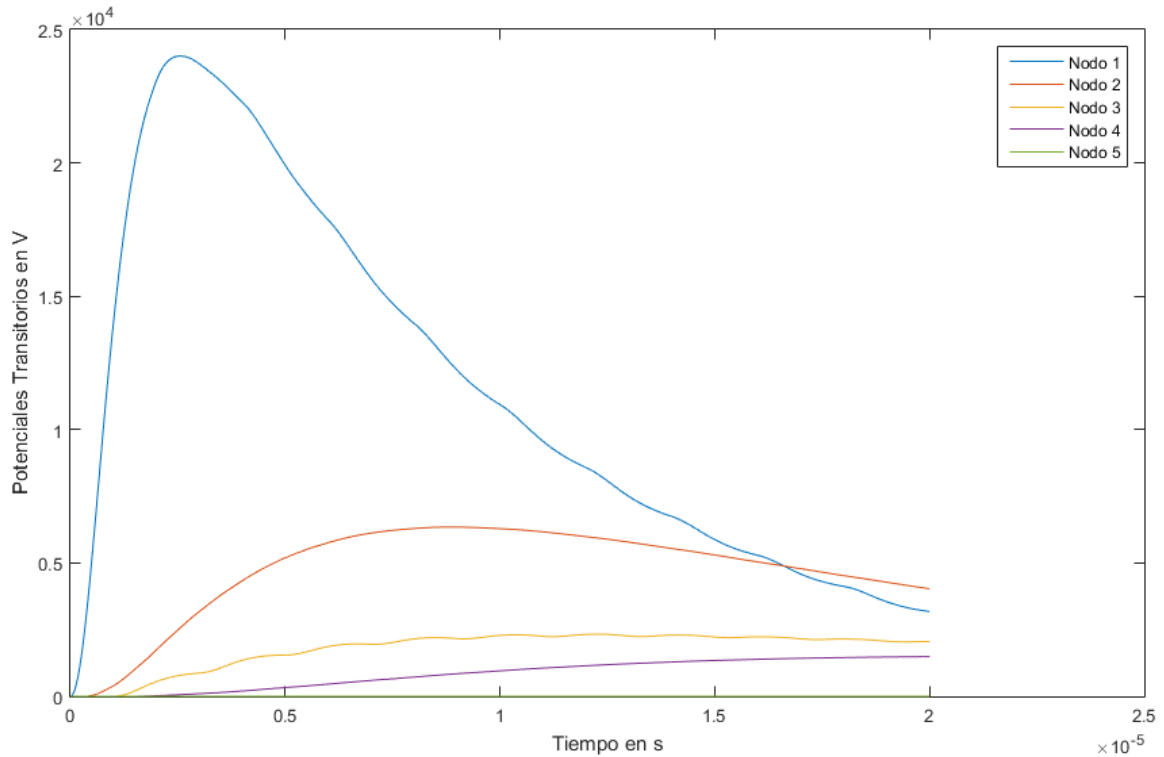


Figura 3.4. Potenciales transitorios en distintos nodos de la malla de tierra propuesta.

Como se puede apreciar el potencial en el punto de impacto es la mitad del que tiene lugar para el caso anterior y en el resto de los nodos, la reducción de tensión también significativa.

3.2 Propuesta de protección contra impactos directos de descargas atmosféricas para parque Cantarrana 1MW

El parque solar Cantarrana 1MW cuenta con 232 m de ancho y 220 m de largo aproximadamente. Como se mencionó anteriormente el sistema de pararrayos está montado sobre los 37 postes de iluminación colocados en el cercado perimetral. La figura 3.5 muestra como queda el área de protección que brinda el diseño actual de pararrayos, para una corriente de protección de 10 kA.

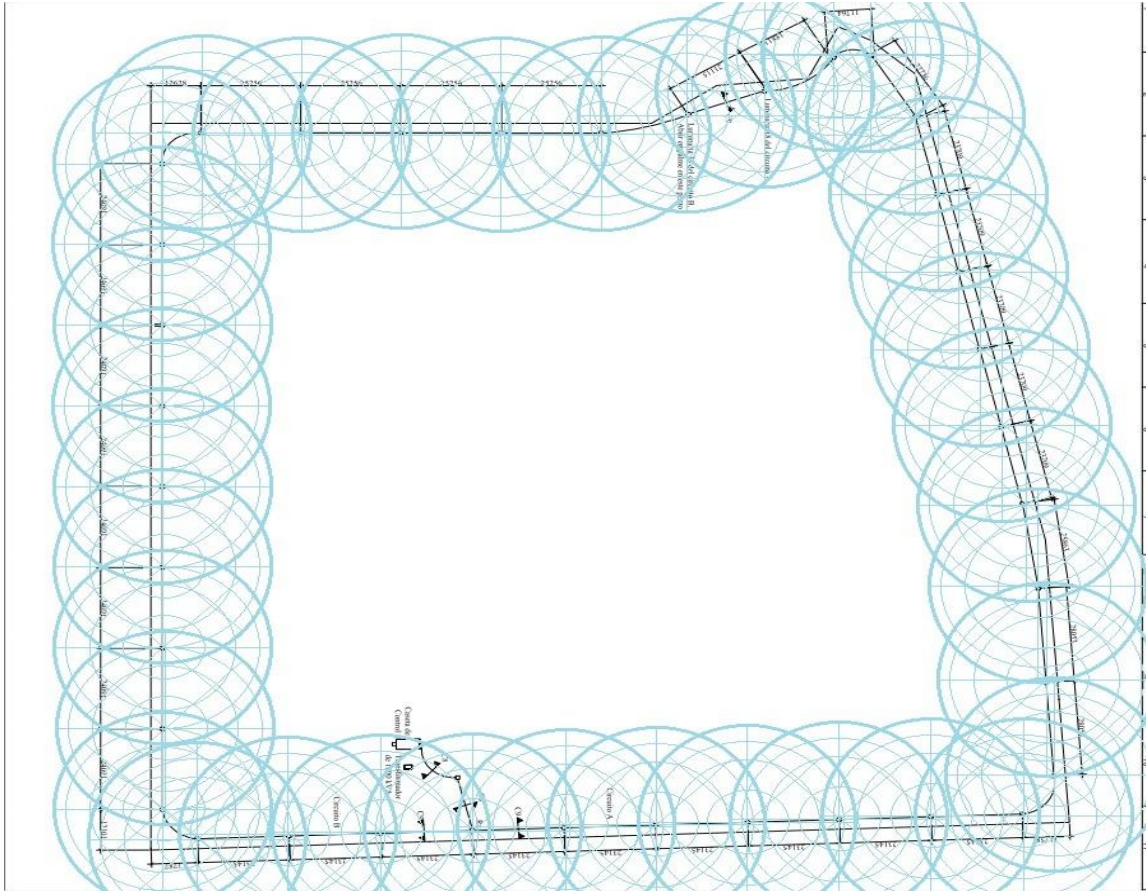
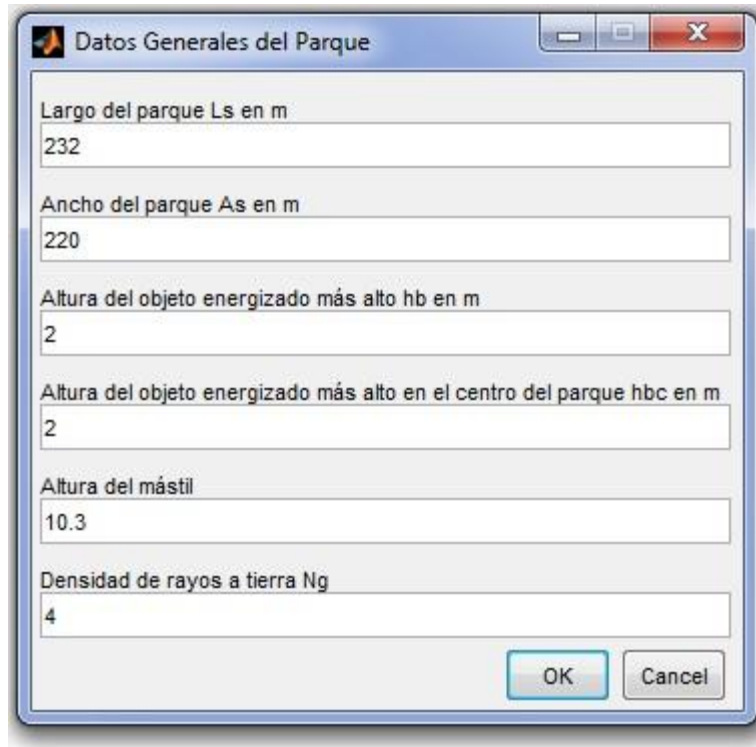


Figura 3.5. Área de protección del sistema de pararrayos.

Se puede apreciar en la figura 3.5 como gran parte del área del parque queda desprotegida del impacto directo de un rayo, el radio calculado del área de protección de cada mástil r_f es 25 m.

Con la ayuda del programa desarrollado FOTOPROT, con el conocimiento de las dimensiones del parque y la información necesaria para el cálculo figura 3.6, se determinó la cantidad de mástiles necesarios para una protección total del parque y su ubicación dentro del área.



The image shows a software dialog box titled "Datos Generales del Parque". It contains several input fields with the following values:

Parameter	Value
Largo del parque L_s en m	232
Ancho del parque A_s en m	220
Altura del objeto energizado más alto h_b en m	2
Altura del objeto energizado más alto en el centro del parque h_{bc} en m	2
Altura del mástil	10.3
Densidad de rayos a tierra N_g	4

At the bottom right of the dialog box are two buttons: "OK" and "Cancel".

Figura 3.6. Datos Generales del Parque Solar de Cantarrana.

Es importante destacar que como altura del objeto energizado más alto se toma la altura del borde más alejado del suelo del panel solar; como altura del mástil se tomó la misma que tienen los mástiles del diseño actual 10m con una punta Franklin que sobrepasa el poste en 30cm; la densidad de rayos a tierra se estimó a partir del mapa cerámico del país con un valor de 4 rayos/km² al año.

Los resultados obtenidos se muestran en la ventana de Resultados finales que se muestra en la figura 3.7. Esta figura muestra el número de mástiles por filas y el número de filas; la separación entre mástiles y entre filas y el área total de protección que brindan este conjunto de mástiles.

Parámetro	Valor
Largo del Parque en m	232
Ancho del Parque en m	220
Numero de mástil por fila	7
Numero de filas	7
Separacion entre filas en m	30.7715
Separacion entre mástiles de una misma fila en m	32.7715
Altura de los Mástiles en m	10.3
Corriente de proteccion	9.9064
Razon de salida en salidas al año	1
Area total de atraccion en km ²	0.05104
Distancia de atraccion rs en m	35.5169

Figura 3.7. Resultados finales del estudio de Cantarrana.

La representación gráfica de como quedarían los mástiles sobre el terreno se muestran en la figura 3.8

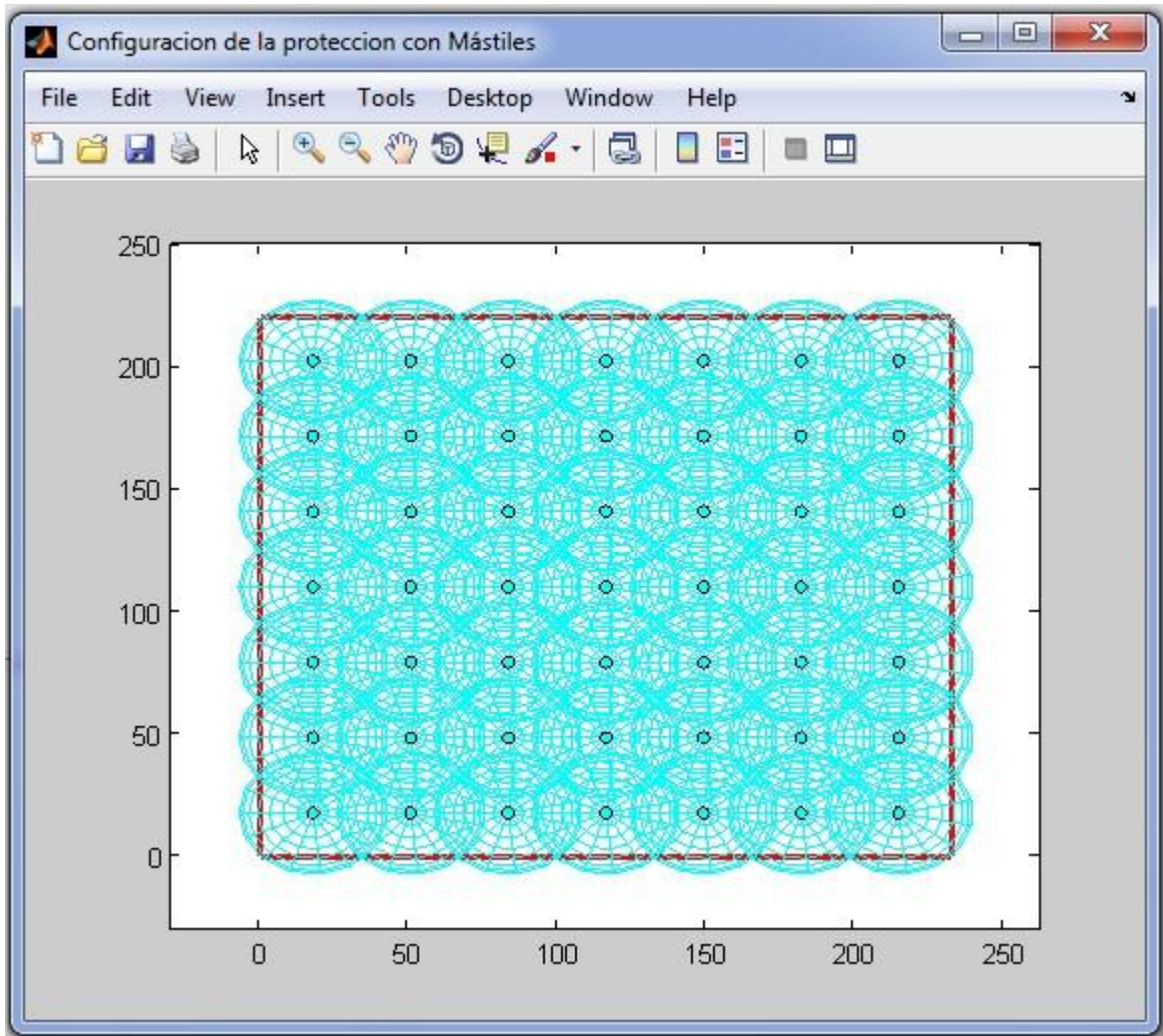


Figura 3.8. Configuración de la protección con mástiles.

Se aprecia claramente la posición de cada mástil sobre el terreno e incluso su área de protección individual, en esta representación se pone de manifiesto la información dada en los Resultados finales de la figura 3.7.

3.3 Consideraciones finales del capítulo

Las aplicaciones computacionales siempre son una forma de ahorro de tiempo en cuanto a los cálculos necesarios para la resolución de un problema. La utilización del PAST en el diseño de la malla de tierra y el análisis del comportamiento de los potenciales transitorios ante la caída de un rayo manifiestan las grandes

diferencias entre el modelo instalado y el sugerido. Los resultados muestran como disminuyen los valores de estos potenciales para la malla sugerida.

La aplicación FOTOPROT es una herramienta de cálculo capaz de determinar el sistema de mástiles necesario para la protección total del área de un Parque Fotovoltaico. Se tomó como objeto de estudio el Parque Solar de Cantarrana 1MW el cual con la ayuda de software FOTOPROT se le realizó el diseño de la protección contra impactos directos de descargas atmosférica a partir de un sistema de mástiles distribuidos en el área de la instalación los cuales brindan una protección total del área del parque.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

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

- La exhaustiva revisión bibliográfica referente a la protección contra descargas atmosféricas de parques fotovoltaicos evidenció su necesidad e importancia en el proyecto de este tipo de instalaciones.
- El análisis detallado del sistema de protección contra sobretensiones que se utiliza en las instalaciones analizadas se destaca como fortaleza debido a la tecnología utilizada y al nivel de protección que este brinda.
- El sistema de puesta a tierra y equipotencialización del parque Santa Clara 1 MW, muestra dificultades que atentan contra la efectividad del mismo como son: la colocación de los electrodos horizontales en la misma zanja y a una separación muy pequeña de los cables de información y de transmisión eléctrica.
- El sistema de protección contra impactos directos de rayos en ambos parque analizados no garantizan una protección total de las instalaciones.
- Las propuestas realizadas para malla de tierra y protección contra impactos directos de rayo, superan ampliamente a las existentes en las instalaciones objeto de estudio.
- La interfaz gráfica **FOTOPROT** desarrollada constituye una herramienta muy útil para el diseño de la protección contra impactos directos de rayo en este tipo de instalaciones.

Recomendaciones

- Debido a la necesidad de nuestro país de seguir con la construcción de parques fotovoltaicos, se recomienda profundizar en el estudio de las protecciones de estas instalaciones ya que estos parques tienen un costo considerable el cual debemos proteger.
- Proponer a la Unión Eléctrica la utilización del programa **FOTOPROT** para el cálculo del sistema de protecciones contra impactos directos de rayos en los parques ya existentes y tenerlo en cuenta para futuros proyectos.
- Recomendamos que **FOTOPROT** forme parte del paquete de software de la carrera de Ingeniería Eléctrica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] I. Chávez, "Desarrollo en Cuba de la energía solar fotovoltaica," 2015.
- [2] 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.
- [3] eNGineering. (2010). *RECOMENDACIONES GENERALES PARA LA PROTECCIÓN DE LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS AISLADOS CONTRA LAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS* Available: <http://renewableengineering.blogspot.com>
- [4] P. G. V. Jesús C. Hernández, and Francisco Jurado, Senior Member, IEEE. (2008) Lightning and Surge Protection in Photovoltaic Installations *IEEE*. 1962. Available: <http://ieeexplore.ieee.org>.
- [5] 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.
- [6] I. B. Sardinero, "Instalación solar fotovoltaica conectada a red sobre la azotea de una nave industrial.," INGENIERIA TÉCNICA INDUSTRIAL: ELECTRICIDAD, UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR, España, 2012.
- [7] S. A. U. DEHN IBÉRICA Protecciones Eléctricas. (2015). *DEHNguard® modular con fusible integrado*. Available: <http://www.dehn-international.com/DEHNguard®> modular con fusible integrado _ DEHN Spain/

- [8] S. A. U. DEHN IBÉRICA Protecciones Eléctricas. (2015). *BLITZDUCTOR® VT*. Available: [http://www.dehn-international.com/BLITZDUCTOR® VT _ DEHN International/](http://www.dehn-international.com/BLITZDUCTOR®_VT_DEHN_International/)
- [9] E. d. I. p. l. E. (INEL), "Sistema Eléctrico de Fuerza, Alumbrado, Tierra y Pararrayos," ed. Cienfuegos 2012.
- [10] D. C. Á. C. V. Rojas, "Protección de Subestaciones," ed, 2007.