UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Eléctrica

Guía técnica y metodológica

para la simulación de sistemas fotovoltaicos en ETAP aplicada a proyectos de consultoría y auditoría energética

Autor:

Jorge Iván Torres Gaona

Código: 20202007075

Directores:

Carlos Adrián Correa Flórez

Fabio Gonzalez Benitez

Entidad de apoyo:

Corporación EMA

Bogotá D.C., Colombia

2026

Resumen

El presente trabajo tuvo como objetivo desarrollar e implementar una guía metodológica estandarizada para la evaluación de sistemas solares fotovoltaicos en procesos de consultoría y auditoría energética mediante el uso del software ETAP. La metodología fue desarrollada en el marco de la pasantía realizada en la Corporación EMA, con el propósito de fortalecer los estudios de prefactibilidad fotovoltaica, mejorando la precisión, confiabilidad y estandarización de los análisis técnicos desarrollados por la empresa.

Inicialmente, se realizó un diagnóstico del proceso de evaluación empleado por la organización, identificando oportunidades de mejora relacionadas con el modelado y simulación de sistemas fotovoltaicos. Posteriormente, se diseñó una guía metodológica que describe de manera secuencial el procedimiento para el modelado de los diferentes componentes del sistema eléctrico y la ejecución de estudios de flujo de potencia en corriente continua (DC) y corriente alterna (AC), análisis de cortocircuito, coordinación de protecciones y diseño de mallas de puesta a tierra conforme a la metodología establecida en la norma IEEE Std 80.

Como complemento de la metodología, se desarrolló un archivo plantilla (.otp) en ETAP con la parametrización de los principales componentes utilizados en sistemas fotovoltaicos, permitiendo estandarizar los procesos de modelado y reducir los tiempos requeridos para la elaboración de futuros estudios. La metodología fue validada mediante un caso de estudio real, en el cual se verificó el comportamiento del sistema bajo condiciones normales de operación y escenarios de falla, obteniendo resultados que evidencian el correcto desempeño de las protecciones, el cumplimiento de los criterios de seguridad eléctrica y la adecuada operación de la malla de puesta a tierra.

Los resultados obtenidos demuestran que la implementación de una metodología estandarizada en ETAP constituye una herramienta de gran utilidad para el desarrollo de estudios de prefactibilidad fotovoltaica, permitiendo optimizar los tiempos de ingeniería, mejorar la calidad de los análisis

técnicos y fortalecer los procesos de consultoría energética desarrollados por la Corporación EMA.

Palabras clave: ETAP, sistemas fotovoltaicos, prefactibilidad, simulación eléctrica, flujo de potencia, cortocircuito, coordinación de protecciones, puesta a tierra, IEEE Std 80.

Índice general

1. Introducción **1**

2. Planteamiento del Problema **3**

3. Objetivos **5**

3.1. Objetivo General 5

3.2. Objetivos Específicos 5

4. Metodología General **7**

4.1. Enfoque Metodológico 7

4.2. Fases del Proyecto 8

4.2.1. Fase 1: Diagnóstico 8

4.2.2. Fase 2: Estructuración de la metodología 9

4.2.3. Fase 3: Implementación 9

4.2.4. Fase 4: Validación 10

5. Modelado del Sistema Fotovoltaico en ETAP **11**

5.1. Construcción del diagrama unifilar 11

5.2. Modelado de componentes eléctricos 12

5.2.1. Transformadores 13

5.2.2. Conductores AC 17

5.2.3. Cargas 20

5.3. Modelado del sistema fotovoltaico 22

5.3.1. Paneles Solares 22

5.3.2. Inversores 25
5.3.3. Conductores DC 26

6. Análisis Técnicos en ETAP 29
6.1. Flujo de Carga 29
6.1.1. Flujo DC 30
6.1.2. Flujo Ac 33
6.2. Análisis de Cortocircuito 37
6.2.1. Corto Circuito DC 38
6.2.2. Corto Circuito AC 43
6.3. Interpretación de Resultados 47

7. Aplicación en Caso de Estudio 49
7.1. Descripción del sistema 49
7.1.1. Criterios Técnicos de Diseño 55
7.1.2. Dimensionamiento técnico de Cable DC y Protecciones en DC 60
7.1.3. Dimensionamiento técnico de Cable AC y Protecciones en AC 63
7.2. Simulaciones en ETAP 69

8. Resultados e Impacto 79
8.1. Mejoras técnicas obtenidas 80

9. Conclusiones 82

Referencias 84

Capítulo 1

Introducción

Actualmente, la ingeniería eléctrica ha experimentado un crecimiento significativo en las áreas relacionadas con las energías renovables y su integración dentro de los sistemas eléctricos de potencia. La transición energética mundial ha impulsado el desarrollo de proyectos que buscan incorporar tecnologías sostenibles, mejorar la eficiencia energética y reducir la dependencia de los combustibles fósiles. En este contexto, el diseño y la evaluación de sistemas eléctricos han evolucionado hacia metodologías apoyadas en herramientas computacionales que permiten analizar el comportamiento de las instalaciones antes de su puesta en operación.

Entre las herramientas de simulación más utilizadas en el sector eléctrico se encuentra el software ETAP (Electrical Transient Analyzer Program) (ETAP, 2021), el cual ofrece un entorno integrado para el modelado, análisis y simulación de sistemas eléctricos de potencia. Sus aplicaciones abarcan estudios de flujo de carga en sistemas de corriente alterna y corriente continua, análisis de líneas de transmisión y transformadores, diseño y evaluación de sistemas de puesta a tierra mediante cálculos de tensiones de paso y contacto, modelado de sistemas de almacenamiento de energía mediante baterías, integración de sistemas fotovoltaicos e inversores, análisis de cortocircuito en AC y DC, coordinación de protecciones eléctricas y estudios de calidad de la energía, entre otros.

La diversidad de funcionalidades ofrecidas por este tipo de herramientas permite su implementación en diferentes áreas de la ingeniería, particularmente en los procesos de consultoría y auditoría energética. De acuerdo con el Ministerio de Hidrocarburos y Energías, una auditoría energética constituye una herramienta de análisis sistemático de la situación energética de una empresa o institución, cuyo propósito es determinar su desempeño energético actual, siendo comúnmente comparada con una fotografía o radiografía del comportamiento energético de una instalación

(ENERGIAS, 2022).

A partir de esta definición, puede establecerse que el objetivo principal de una auditoría energética es caracterizar el comportamiento eléctrico y energético de una instalación, identificando las condiciones de operación existentes, los patrones de consumo y las posibles deficiencias técnicas presentes en el sistema. Con base en dicho diagnóstico, es posible formular alternativas de mejora orientadas a incrementar la eficiencia energética, optimizar el uso de los recursos disponibles e implementar nuevas soluciones tecnológicas, tales como sistemas de generación fotovoltaica, almacenamiento de energía o estrategias avanzadas de gestión de la demanda.

En consecuencia, la incorporación de herramientas de simulación como ETAP en los procesos de auditoría energética representa una oportunidad para desarrollar análisis más rigurosos y sustentados técnicamente, permitiendo evaluar de manera anticipada el impacto de diferentes alternativas de intervención sobre el sistema eléctrico y facilitando la toma de decisiones en proyectos de modernización y transición energética.

Capítulo 2

Planteamiento del Problema

La Corporación para la Energía y el Medio Ambiente (CorpoEMA) es una organización comprometida con la promoción de la eficiencia energética, la implementación de energías renovables, el desarrollo sostenible y la conservación del medio ambiente. Desde su creación, ha enfocado sus esfuerzos en la prestación de servicios de consultoría y auditoría energética, contribuyendo al fortalecimiento de proyectos que buscan mejorar las condiciones energéticas de comunidades, organizaciones y entidades tanto a nivel nacional como internacional.

Dentro de sus actividades principales, CorpoEMA desarrolla estudios técnicos orientados a identificar oportunidades de optimización energética y a evaluar la viabilidad de soluciones basadas en fuentes no convencionales de energía renovable. Estos estudios son ejecutados en diferentes regiones de Colombia y, en algunos casos, en proyectos desarrollados fuera del territorio nacional. Su propósito fundamental consiste en brindar alternativas energéticas sostenibles que permitan mejorar la calidad de vida de las comunidades beneficiarias, garantizando el acceso a servicios energéticos básicos y promoviendo el uso eficiente de los recursos disponibles.

Los proyectos desarrollados por la corporación están dirigidos principalmente a comunidades rurales, juntas de acción comunal, organizaciones sociales y grupos legalmente constituidos que requieren soluciones energéticas adaptadas a sus necesidades particulares. En muchos de estos casos, las iniciativas contemplan la implementación de sistemas fotovoltaicos, sistemas híbridos de generación y estrategias de eficiencia energética que permitan reducir costos operativos y aumentar la confiabilidad del suministro eléctrico.

Para el desarrollo de sus actividades técnicas, CorpoEMA cuenta con diferentes herramientas especializadas de análisis y simulación. Entre ellas se destaca el software ETAP (Electrical

Transient Analyzer Program), una plataforma reconocida internacionalmente para el modelado y análisis de sistemas eléctricos de potencia.

No obstante, durante el desarrollo de la presente pasantía se identificó que, a pesar de contar con la licencia actualizada del software, su utilización dentro de los procesos de auditoría y consultoría energética no se encontraba completamente estandarizada. La aplicación de ETAP dependía en gran medida de los conocimientos individuales de cada profesional, lo que generaba diferencias en la profundidad de los análisis realizados y limitaba el aprovechamiento integral de las funcionalidades disponibles en la plataforma.

Esta situación evidenció la necesidad de desarrollar una guía técnica y metodológica que permitiera establecer criterios uniformes para la utilización de ETAP en proyectos de energía renovable, particularmente en estudios de prefactibilidad fotovoltaica. Mediante la creación de procedimientos estandarizados, plantillas de trabajo y lineamientos de modelado, se busca facilitar la implementación de la herramienta en futuros proyectos, mejorar la calidad de los análisis técnicos y fortalecer los procesos internos de la corporación.

De esta manera, la presente pasantía se constituye como una oportunidad para contribuir al fortalecimiento de las capacidades técnicas de CorpoEMA, promoviendo el uso sistemático de herramientas de simulación avanzadas que permitan respaldar con mayor rigurosidad las decisiones asociadas al diseño e implementación de soluciones energéticas sostenibles.

Capítulo 3

Objetivos

3.1. Objetivo General

Desarrollar e implementar una guía metodológica estandarizada para la evaluación de sistemas solares fotovoltaicos en procesos de consultoría y auditoría energética, mediante el uso aplicado del software ETAP, con el fin de mejorar la precisión y confiabilidad de los estudios de prefactibilidad realizados por la empresa.

3.2. Objetivos Específicos

- Diagnosticar y documentar el proceso actual de prefactibilidad fotovoltaica en la Corporación EMA, identificando las limitaciones y oportunidades de mejora específicas en el uso del software ETAP.
- Diseñar y estructurar una guía paso a paso (protocolo) para el modelado, simulación y análisis de sistemas FV conectados a la red utilizando los módulos clave de ETAP (flujo de carga, cortocircuito, calidad de energía).
- Elaborar y parametrizar un archivo plantilla (.otp) en ETAP con modelos base de componentes FV e industriales, que sirva como punto de partida estandarizado para futuros estudios.
- Validar la metodología propuesta aplicándola en al menos un caso de estudio real de la empresa, comparando los resultados técnicos y los tiempos de análisis con el método empleado anteriormente.

- Consolidar y redactar la guía metodológica, el archivo plantilla y los resultados de la validación en un documento técnico final que quede a disposición de la empresa.

Capítulo 4

Metodología General

4.1. Enfoque Metodológico

El presente trabajo se desarrolló bajo un enfoque metodológico aplicado, de carácter descriptivo y propositivo, orientado a la solución de una necesidad identificada en la Corporación EMA relacionada con la ausencia de una metodología estandarizada para la evaluación de sistemas fotovoltaicos mediante el software ETAP. El enfoque aplicado permitió trasladar los conocimientos teóricos adquiridos en el ámbito académico hacia un contexto empresarial real, con el propósito de mejorar los procesos de consultoría y auditoría energética asociados al análisis de proyectos fotovoltaicos.

Desde el punto de vista metodológico, la investigación se fundamentó en el análisis y mejoramiento de procesos, combinando actividades de diagnóstico, revisión documental, diseño metodológico, implementación y validación técnica. Inicialmente, se realizó un reconocimiento del proceso actual de estudios de prefactibilidad fotovoltaica desarrollado por la empresa, identificando las etapas de trabajo existentes, las herramientas empleadas y las principales limitaciones en la utilización de ETAP para la simulación de sistemas eléctricos con generación fotovoltaica.

A partir de la información recopilada, se diseñó una guía metodológica estructurada en procedimientos secuenciales que abarcan la recopilación de información del cliente, la construcción del modelo unifilar en ETAP, la parametrización de los componentes eléctricos y fotovoltaicos, la ejecución de simulaciones y la interpretación de los resultados obtenidos. La metodología fue concebida para ser práctica, reproducible y adaptable a diferentes escenarios de consultoría energética.

Como parte del desarrollo metodológico, se elaboraron plantillas de modelado y archivos base

en ETAP que facilitan la estandarización de los estudios y reducen los tiempos de ejecución de los análisis técnicos. Finalmente, la metodología propuesta fue validada mediante su aplicación en un caso de estudio real de la Corporación EMA, permitiendo comparar los resultados obtenidos con el procedimiento utilizado anteriormente y evaluar su impacto en términos de precisión, trazabilidad y eficiencia operativa.

En consecuencia, el enfoque metodológico adoptado se basó en un proceso iterativo de diagnóstico, diseño, implementación y validación, orientado a generar una herramienta técnica que contribuya al fortalecimiento de las capacidades de consultoría de la empresa y al desarrollo de estudios de prefactibilidad fotovoltaica más rigurosos, confiables y técnicamente sustentados.

4.2. Fases del Proyecto

Con el propósito de desarrollar una guía técnica y metodológica para la simulación de sistemas fotovoltaicos en ETAP aplicada a procesos de consultoría y auditoría energética, el proyecto se estructuró en cuatro fases principales. Cada una de estas etapas permitió avanzar de manera secuencial desde el diagnóstico de las prácticas existentes hasta la validación de la metodología propuesta en un entorno empresarial real.

4.2.1. Fase 1: Diagnóstico

La primera fase estuvo orientada al reconocimiento de la estructura organizacional y de los procedimientos empleados por la Corporación EMA en el desarrollo de estudios de prefactibilidad fotovoltaica. Se realizó un análisis detallado del flujo de trabajo existente, identificando las actividades desarrolladas por los auditores, las fuentes de información utilizadas y las herramientas de análisis implementadas durante la elaboración de los estudios técnicos. Adicionalmente, se evaluó el nivel de utilización del software ETAP dentro de la empresa, identificando que su aplicación se encontraba limitada principalmente a análisis eléctricos convencionales y que no existía un procedimiento estandarizado para el modelado y evaluación de sistemas fotovoltaicos. Como resultado de esta etapa, se identificaron oportunidades de mejora relacionadas con la estandarización de criterios técnicos, la reducción de la dependencia del conocimiento individual de cada auditor y el aprovechamiento de las funcionalidades avanzadas del software para estudios de integración de

generación fotovoltaica.

4.2.2. Fase 2: Estructuración de la metodología

Una vez identificadas las necesidades de la empresa, se procedió al diseño de una metodología de trabajo estandarizada para la simulación de sistemas fotovoltaicos en ETAP. Para ello, se realizó una revisión de la normativa aplicable, las recomendaciones técnicas internacionales y la documentación especializada relacionada con la integración de generación distribuida y el uso de herramientas de simulación de sistemas de potencia. La metodología propuesta se estructuró como un procedimiento secuencial que contempla las etapas de recopilación de información técnica del cliente, construcción del diagrama unifilar, parametrización de equipos eléctricos y componentes fotovoltaicos, configuración de escenarios de operación y ejecución de los estudios eléctricos requeridos. Asimismo, se definieron criterios de interpretación de resultados y se desarrollaron plantillas base en ETAP con el fin de garantizar la repetibilidad de los análisis y optimizar los tiempos de desarrollo de futuros proyectos.

4.2.3. Fase 3: Implementación

La tercera fase consistió en la aplicación práctica de la metodología desarrollada en proyectos reales de la Corporación EMA. Durante esta etapa se implementó el procedimiento propuesto en estudios de prefactibilidad fotovoltaica, utilizando información suministrada por los clientes, tales como diagramas unifilares, características de las cargas, perfiles de consumo y condiciones operativas de las instalaciones. A partir de esta información se construyeron los modelos correspondientes en ETAP y se ejecutaron diferentes análisis eléctricos, incluyendo estudios de flujo de carga, niveles de tensión, comportamiento ante condiciones de falla y evaluación del impacto de la incorporación de sistemas fotovoltaicos sobre la red existente. La implementación permitió verificar la aplicabilidad de la metodología en escenarios reales de consultoría y generar documentación técnica estandarizada para cada uno de los estudios realizados.

4.2.4. Fase 4: Validación

Finalmente, se desarrolló una etapa de validación orientada a evaluar el desempeño de la metodología propuesta frente al procedimiento utilizado previamente por la empresa. Para ello, se compararon los resultados obtenidos en términos de precisión de los análisis, trazabilidad de la información, nivel de detalle de los estudios y tiempos requeridos para la ejecución de las actividades de simulación. La validación permitió evidenciar que la implementación de una metodología estructurada en ETAP mejora la uniformidad de los criterios técnicos empleados en los estudios de prefactibilidad fotovoltaica, facilita la capacitación de nuevo personal y proporciona herramientas de análisis más robustas para la toma de decisiones. Asimismo, se confirmó que la estandarización del proceso constituye un mecanismo efectivo para incrementar la calidad técnica y la confiabilidad de los servicios de consultoría y auditoría energética ofrecidos por la Corporación EMA.

Capítulo 5

Modelado del Sistema Fotovoltaico en ETAP

5.1. Construcción del diagrama unifilar

La construcción del diagrama unifilar constituye la primera etapa para el desarrollo de cualquier estudio de simulación en ETAP, ya que permite representar de manera simplificada la topología del sistema eléctrico del cliente y establecer las bases para la ejecución de análisis posteriores. Un modelo correctamente estructurado garantiza que los resultados obtenidos mediante las simulaciones sean representativos del comportamiento real de la instalación eléctrica. En el contexto de las auditorías energéticas y los estudios de prefactibilidad fotovoltaica, el proceso de construcción del diagrama unifilar inicia con la recopilación de la información técnica disponible del cliente o consumidor. Esta información puede obtenerse a partir de planos eléctricos existentes, memorias de diseño, diagramas unifilares previamente elaborados, registros históricos de consumo energético, fichas técnicas de equipos instalados y visitas de inspección en campo. Cuando la información documental es insuficiente o presenta inconsistencias, es necesario realizar levantamientos técnicos que permitan identificar las características reales de la instalación. Una vez recopilada la información, se procede a identificar los elementos principales que conforman el sistema eléctrico. Dentro de estos se encuentran el punto de conexión con la red de distribución, transformadores de potencia, tableros generales y de distribución, alimentadores, cargas eléctricas y, cuando aplique, sistemas de generación existentes y equipos de almacenamiento de energía. Cada uno de estos componentes debe ser caracterizado mediante parámetros eléctricos que permitan su representación adecuada dentro del software. Posteriormente, se realiza la creación de un nuevo proyecto en ETAP, definiendo inicialmente las unidades de trabajo y la frecuencia nominal del sis-

tema eléctrico. A continuación, se procede a construir el diagrama unifilar mediante la inserción de los diferentes elementos disponibles en la biblioteca del programa, siguiendo la misma secuencia física presente en la instalación del cliente. El modelado normalmente inicia desde el punto de conexión con la red eléctrica y continúa aguas abajo hasta representar la totalidad de las cargas existentes. Para cada componente incorporado en el diagrama es necesario ingresar la información eléctrica correspondiente. En el caso de las barras se especifican los niveles de tensión nominal; para los transformadores se registran parámetros como potencia nominal, tensiones primaria y secundaria, impedancia y configuración de conexión; en las líneas y alimentadores se ingresan las características de los conductores, su longitud y método de instalación; mientras que las cargas son parametrizadas mediante su potencia instalada, factor de potencia y características operativas. Una vez construido el modelo base de la instalación eléctrica, se realiza una verificación de la conectividad entre todos los elementos del sistema, asegurando la ausencia de errores de modelado, componentes desconectados o inconsistencias en los niveles de tensión. Esta etapa resulta fundamental debido a que cualquier error en la estructura del diagrama unifilar puede generar resultados de simulación incorrectos o impedir la ejecución de los estudios eléctricos posteriores. Finalmente, el diagrama unifilar validado constituye el punto de partida para la integración del sistema fotovoltaico dentro de ETAP. A partir de este modelo es posible incorporar módulos fotovoltaicos, inversores, sistemas de almacenamiento y estrategias de operación específicas, permitiendo analizar el impacto técnico de la generación distribuida sobre la instalación eléctrica existente mediante estudios de flujo de carga, cortocircuito, calidad de la energía y coordinación de protecciones.

5.2. Modelado de componentes eléctricos

El proceso de modelado de los componentes eléctricos y de los elementos pertenecientes al sistema fotovoltaico requiere, como primer paso, la familiarización con la interfaz principal del software ETAP. En ella se encuentran disponibles las bibliotecas de equipos eléctricos y dispositivos necesarios para la elaboración del diagrama unifilar, los cuales pueden ser incorporados al proyecto mediante herramientas de diseño gráfico. La correcta identificación y selección de estos componentes garantiza una representación adecuada de la infraestructura eléctrica y facilita el posterior análisis del comportamiento del sistema fotovoltaico bajo diferentes condiciones de

operación.

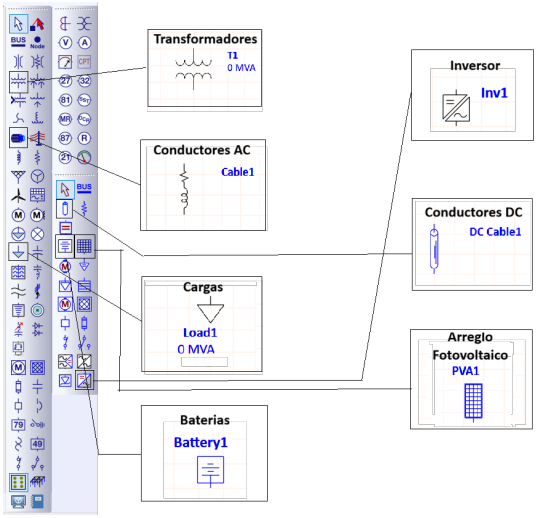


Figura 1: Componentes Eléctricos y Fotovoltaicos, Fuente: Elaboración Propia a partir del Software ETAP

5.2.1. Transformadores

El proceso de modelado del transformador inicia con la selección del elemento correspondiente desde la biblioteca de componentes de ETAP. Una vez incorporado al área de trabajo, se procede a configurar sus parámetros eléctricos, entre los que se encuentran la potencia nominal, los niveles de tensión del devanado primario y secundario, la frecuencia de operación, el grupo de conexión y la impedancia porcentual. La definición adecuada de estos parámetros permite que el modelo represente fielmente las características del equipo dentro del sistema fotovoltaico.

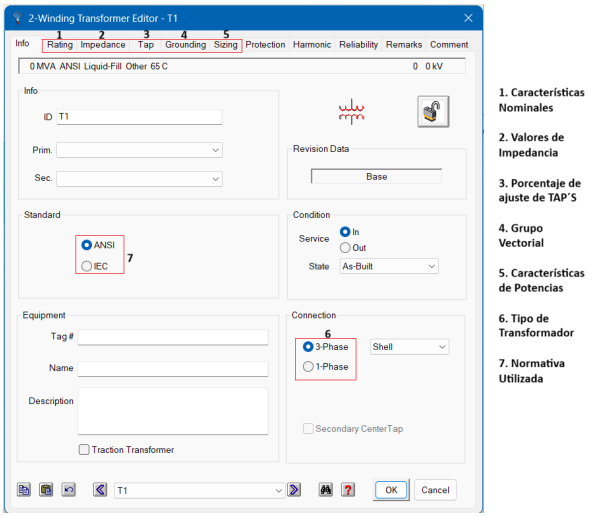


Figura 2: Descripción Características Básicas de Transformador, Fuente: Elaboración Propia a partir del Software ETAP

Definida las opciones presentes dentro del transformador se puede proceder a definir las características basados en un catalogo de fabricante o información obtenida por la placa del transformador, para ello a continuación se presenta una placa característica de un transformador trifasico:

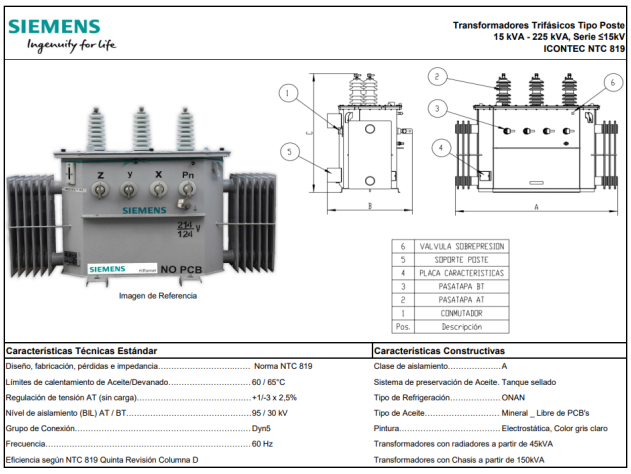


Figura 3: Transformador trifásico tipo poste Siemens: Adaptado de ficha técnica transformador

Una vez obtenida la placa de características o la ficha técnica del transformador, se procede a realizar su caracterización dentro del software ETAP. Para ello, inicialmente se diligencian

los parámetros correspondientes a las características nominales del equipo y a sus valores de impedancia, utilizando la información suministrada por el fabricante. Esta etapa es fundamental, ya que permite que el modelo represente de manera adecuada el comportamiento eléctrico del transformador durante las simulaciones y análisis posteriores.

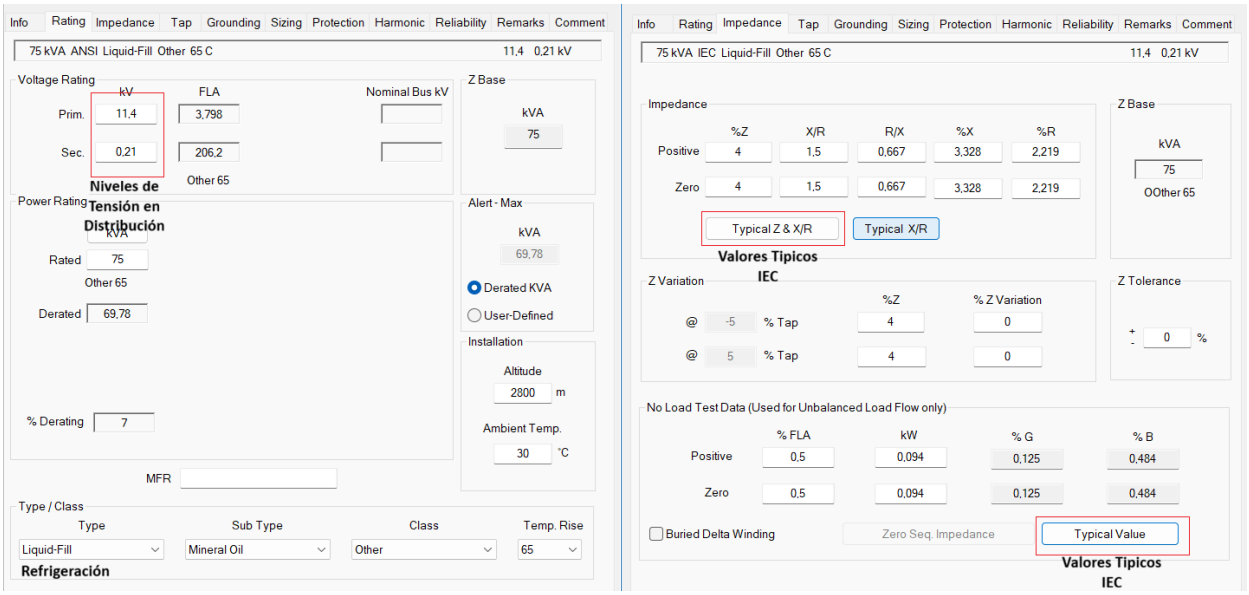


Figura 4: Caracteristicas nominales y valores de Impedancias, Fuente: Elaboración Propia a partir del Software ETAP

Estos datos presentes en 4 corresponden a los datos del transformador con características nominales de distribución en la ciudad de Bogotá 11.4kV por el lado de Media Tensión y 208V por el lado de Baja, posteriormente para los valores de impedancias se colocaron los valores típicos definidos por el software en este caso para normativa IEC, sin embargo si se requiere podría utilizarse tipo ANSI. en el caso de Colombia especialmente para este tipo de equipos se caracterizara por IEC. Continuando se ajustan los parametros de TAP´s y Grupo Vectorial.

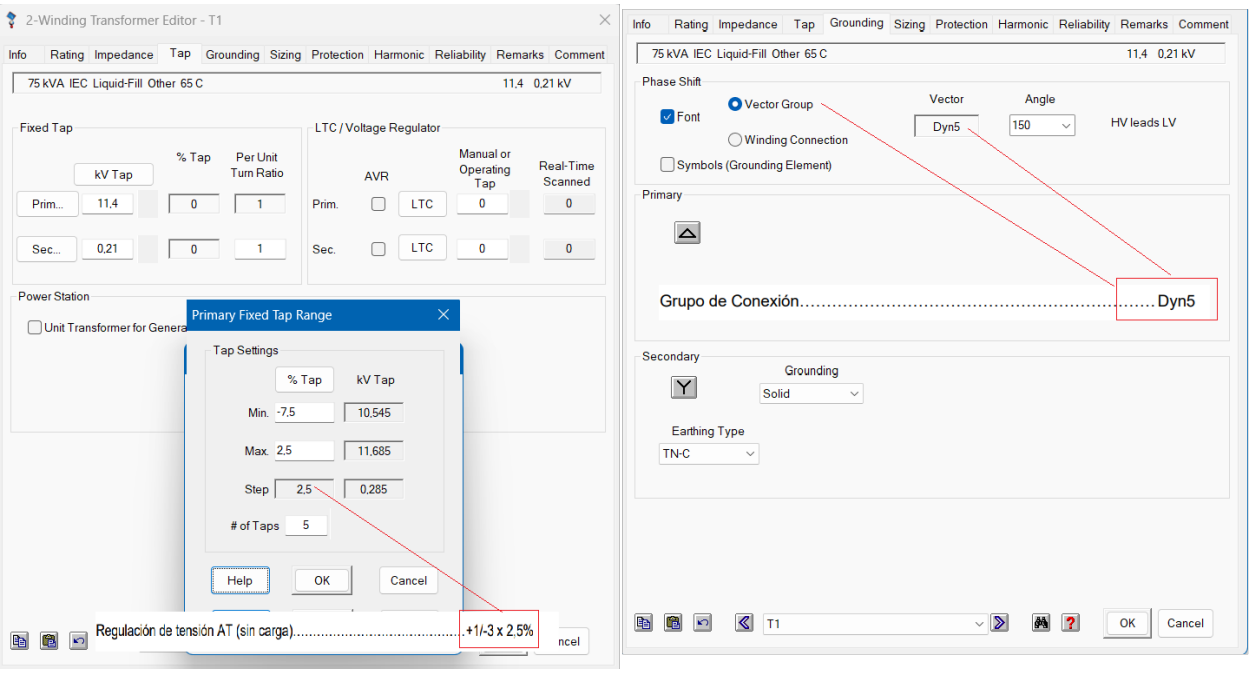


Figura 5: Definición de TAP y Grupo de conexión, Fuente: Elaboración Propia a partir del Software ETAP

Los datos presentados en la Figura 5 corresponden a la información consignada en la ficha técnica del transformador. A partir de estos parámetros se realiza la configuración del grupo de conexión, el cual para este caso corresponde a un Dyn5, así como la parametrización del cambiador de tomas (Tap Changer). Este último se configura con un paso de regulación del 2,5 por ciento por posición, considerando un paso hacia arriba (+1) y tres pasos hacia abajo (-3), para un total de cinco posiciones, incluyendo la posición nominal (0). Con la configuración de estos parámetros se completa la caracterización básica del transformador a partir de la información suministrada en la Figura 3. Los demás parámetros disponibles en la interfaz de configuración de ETAP corresponden a variables que pueden ser calculadas automáticamente por el software durante la ejecución de estudios específicos, como el flujo de carga, el análisis de cortocircuito o la coordinación de protecciones. Por esta razón, dichos parámetros no se desarrollan en el presente documento, dado que no son necesarios para el alcance del modelado realizado. No obstante, es importante resaltar que su configuración puede ser requerida en estudios posteriores que demanden un nivel de análisis más detallado.

5.2.2. Conductores AC

El proceso de modelado de los conductores en corriente alterna (AC) inicia con la selección del elemento correspondiente desde la biblioteca de componentes de ETAP. Una vez incorporado al área de trabajo, se procede a configurar sus características eléctricas y físicas, entre las que se encuentran el tipo de conductor, el material, el calibre, la longitud, el número de conductores por fase, el método de instalación y el nivel de tensión de operación. La correcta definición de estos parámetros permite representar con precisión la impedancia del conductor y las pérdidas asociadas a la transmisión de energía, garantizando resultados confiables durante los diferentes estudios eléctricos del sistema. Cuando se dispone de una referencia específica del conductor y de sus características técnicas, como la longitud, el calibre y el material de fabricación, es posible utilizar las bibliotecas internas de ETAP para seleccionar el equipo directamente desde los catálogos de fabricantes incorporados en el software. Esta funcionalidad permite asignar automáticamente las propiedades eléctricas del conductor, garantizando que el modelo emplee parámetros consistentes con las especificaciones del fabricante y mejorando la precisión de los estudios realizados.

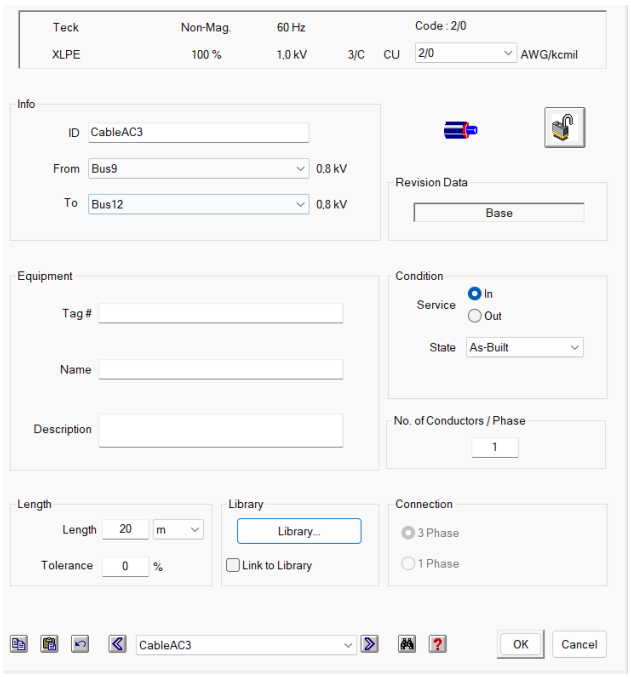


Figura 6: Pantalla Principal Conductor AC-Libreria, Fuente: Elaboración Propia a partir del Software ETAP

Una vez definida la longitud del conductor en AC se procede a seleccionar, las características del conductor a utilizar para ello dentro del apartado de librerias se tiene la siguiente sección:

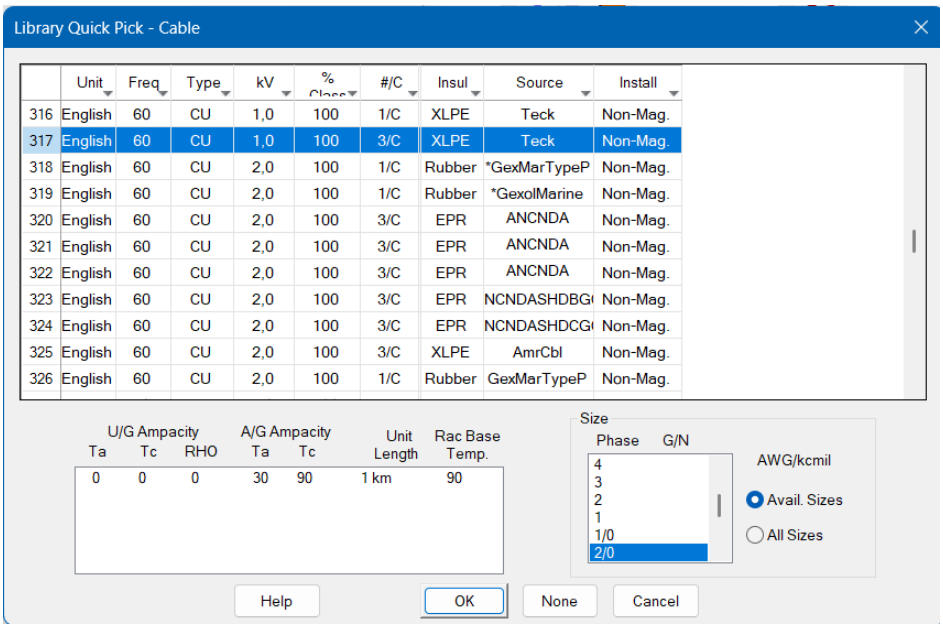


Figura 7: Sección de Libreria de conductor, Fuente: Elaboración Propia a partir del Software ETAP

En la Figura 7 se presentan los parámetros requeridos para la selección de un conductor desde las bibliotecas del software ETAP. En esta sección se encuentran disponibles las principales características eléctricas, mecánicas y físicas de los conductores, lo que permite realizar una selección acorde con las especificaciones técnicas del proyecto. Gracias a la integración de catálogos de diferentes fabricantes, el software ofrece una amplia variedad de referencias comerciales, facilitando la incorporación del conductor que mejor se ajuste a las condiciones de diseño. A continuación, se muestra dicha selección.

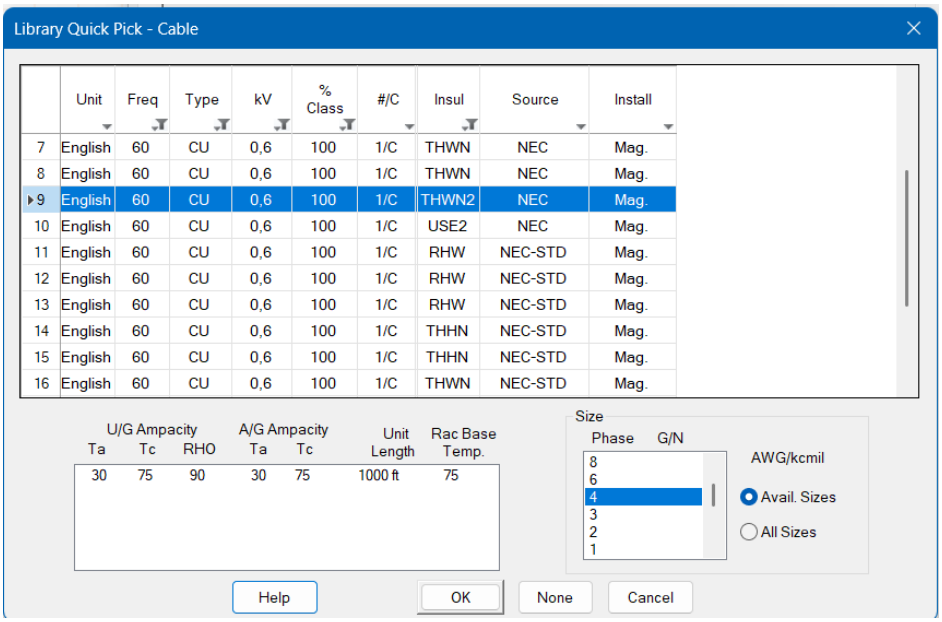


Figura 8: Características de conductor AC seleccionado, Fuente: Elaboración Propia a partir del Software ETAP

Cuadro 1: Características del conductor seleccionado desde la biblioteca de ETAP

Parámetro	**Valor seleccionado**
Sistema de unidades	English
Frecuencia	60 Hz
Material del conductor	Cobre (CU)
Nivel de tensión	0.6 kV
Clase de aislamiento	100 %
Número de conductores	1/C
Tipo de aislamiento	THWN2
Norma / Fuente	NEC
Método de instalación	Magnético (Mag.)
Ampacidad subterránea (Ta)	30 °C
Temperatura del conductor (Tc)	75 °C
Resistividad térmica del suelo (RHO)	90
Ampacidad en aire (Ta)	30 °C
Temperatura en aire (Tc)	75 °C
Longitud base	1000 ft
Temperatura base para resistencia AC	75 °C
Calibre del conductor	4 AWG

5.2.3. Cargas

El modelado de las cargas inicia con la selección del componente correspondiente desde la biblioteca de ETAP. Posteriormente, se configuran los parámetros eléctricos de acuerdo con las condiciones de operación del sistema, incluyendo la potencia activa y reactiva, la tensión nominal, el factor de potencia, el tipo de conexión y el modelo de carga que mejor represente el comportamiento del consumidor. La adecuada parametrización de estos valores permite simular de forma realista la demanda eléctrica del sistema y evaluar su influencia sobre variables como el flujo de potencia, los niveles de tensión y las corrientes de operación. Para

la caracterización de las cargas del sistema se emplean cargas estáticas, ya que estas representan adecuadamente las condiciones de operación consideradas en el presente proyecto. En ETAP, este tipo de carga permite definir parámetros como la potencia activa, la potencia reactiva, el factor de potencia y la tensión nominal. No obstante, el software dispone de una amplia biblioteca de modelos de carga que incluyen motores de inducción, motores síncronos y otros equipos con comportamiento dinámico, los cuales pueden ser incorporados cuando el estudio requiere una representación más detallada del sistema eléctrico y de las condiciones reales de operación.

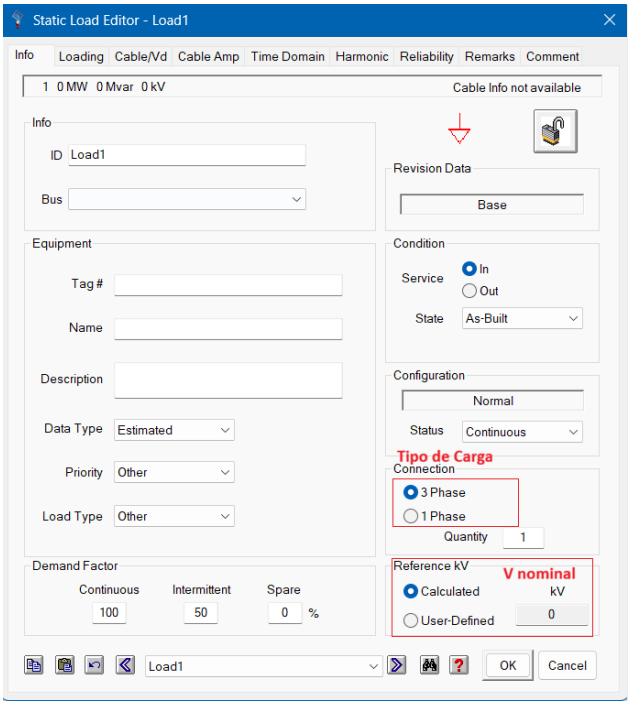


Figura 9: Características Principales de Carga,Fuente: Elaboración Propia a partir del Software ETAP

Una vez definido el tipo de carga, ya sea monofásica o trifásica, y establecido el nivel de tensión nominal, se procede a configurar sus parámetros eléctricos en ETAP. Es importante resaltar que el software asigna automáticamente el valor de tensión de la barra a la cual se conecta la carga; sin embargo, dicho valor también puede definirse manualmente cuando las condiciones del estudio así lo requieran. Posteriormente, se ingresan las variables de potencia de la carga, tales como la potencia activa, el factor de potencia (FP) y la potencia reactiva,

parámetros que permiten representar adecuadamente la demanda eléctrica del sistema.

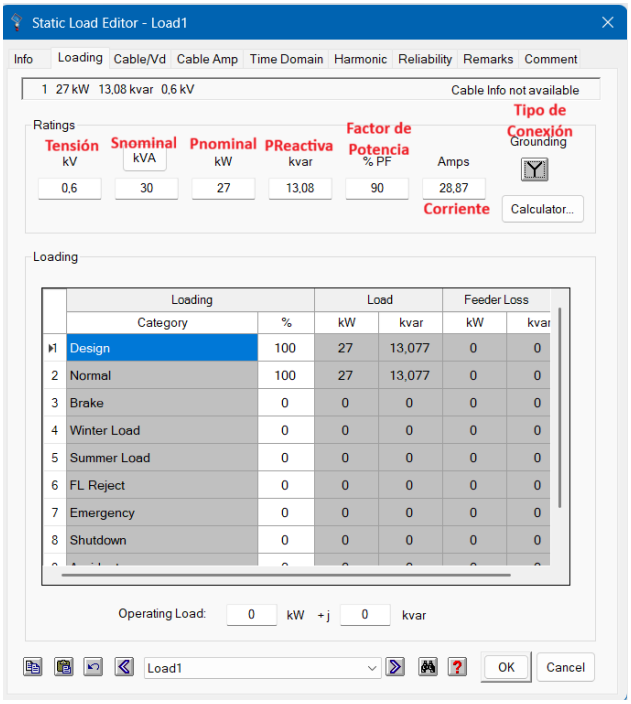
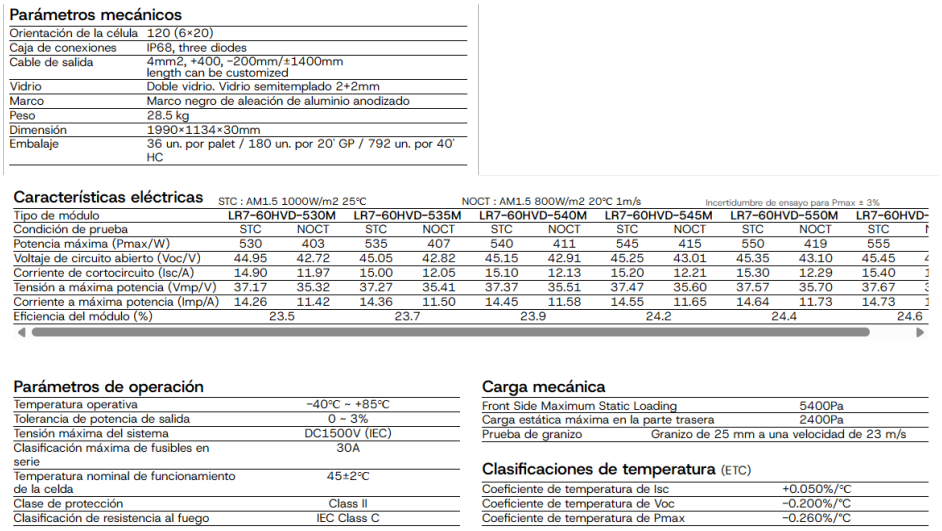


Figura 10: Caracteristicas de carga, Potencias, FP, Fuente:Elaboración Propia a partir del Software ETAP

5.3. Modelado del sistema fotovoltaico

5.3.1. Paneles Solares

El modelado de un módulo fotovoltaico requiere la definición de los parámetros eléctricos proporcionados por el fabricante, ya que estos determinan el comportamiento del panel bajo diferentes condiciones de operación. Aunque ETAP dispone de bibliotecas que permiten seleccionar módulos fotovoltaicos comerciales de diversos fabricantes, también ofrece la posibilidad de crear un modelo personalizado a partir de la información contenida en la ficha técnica del equipo. En esta sección se presenta el procedimiento para la creación de un módulo fotovoltaico utilizando los datos suministrados por el fabricante, en lugar de emplear una referencia previamente disponible en las bibliotecas del software, a continuación se presenta caracteristicas de panel solar.



Parámetros mecánicos

Orientación de la célula	120 (6×20)
Caja de conexiones	IP68, three diodes
Cable de salida	4mm2, +400, -200mm/±1400mm length can be customized
Vidrio	Doble vidrio. Vidrio semitemplado 2+2mm
Marco	Marco negro de aleación de aluminio anodizado
Peso	28.5 kg
Dimensión	1990×1134×30mm
Embalaje	36 un. por palet / 180 un. por 20' GP / 792 un. por 40' HC

Características eléctricas STC : AM1.5 1000W/m2 25℃ NOCT : AM1.5 800W/m2 20℃ 1m/s Incertidumbre de ensayo para Pmax ± 3%

Tipo de módulo	LR7-60HVD-530M		LR7-60HVD-535M		LR7-60HVD-540M		LR7-60HVD-545M		LR7-60HVD-550M		LR7-60HVD-
Condición de prueba	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC
Potencia máxima (Pmax/W)	530	403	535	407	540	411	545	415	550	419	555
Voltaje de circuito abierto (Voc/V)	44.95	42.72	45.05	42.82	45.15	42.91	45.25	43.01	45.35	43.10	45.45
Corriente de cortocircuito (Isc/A)	14.90	11.97	15.00	12.05	15.10	12.13	15.20	12.21	15.30	12.29	15.40
Tensión a máxima potencia (Vmp/V)	37.17	35.32	37.27	35.41	37.37	35.51	37.47	35.60	37.57	35.70	37.67
Corriente a máxima potencia (Imp/A)	14.26	11.42	14.36	11.50	14.45	11.58	14.55	11.65	14.64	11.73	14.73
Eficiencia del módulo (%)	23.5		23.7		23.9		24.2		24.4		24.6

Parámetros de operación

Temperatura operativa	-40℃ ~ +85℃
Tolerancia de potencia de salida	0 ~ 3%
Tensión máxima del sistema	DC1500V (IEC)
Clasificación máxima de fusibles en serie	30A
Temperatura nominal de funcionamiento de la celda	45±2℃
Clase de protección	Class II
Clasificación de resistencia al fuego	IEC Class C

Carga mecánica

Front Side Maximum Static Loading	5400Pa
Carga estática máxima en la parte trasera	2400Pa
Prueba de granizo	Granizo de 25 mm a una velocidad de 23 m/s

Clasificaciones de temperatura (ETC)

Coeficiente de temperatura de Isc	+0.050%/℃
Coeficiente de temperatura de Voc	-0.200%/℃
Coeficiente de temperatura de Pmax	-0.260%/℃

Figura 11: Ficha técnica de panel solar, Fuente: Adaptado de ficha técnica Longi

Una vez analizada la ficha técnica del módulo fotovoltaico Longi (LONGi Solar, 2025) e identificados los parámetros eléctricos suministrados por el fabricante, se procede a realizar su parametrización dentro de la interfaz de ETAP. En esta etapa se ingresan las características nominales del panel, de manera que el modelo represente fielmente el comportamiento del módulo fotovoltaico durante las simulaciones. La configuración de dichos parámetros dentro del software se muestra a continuación.

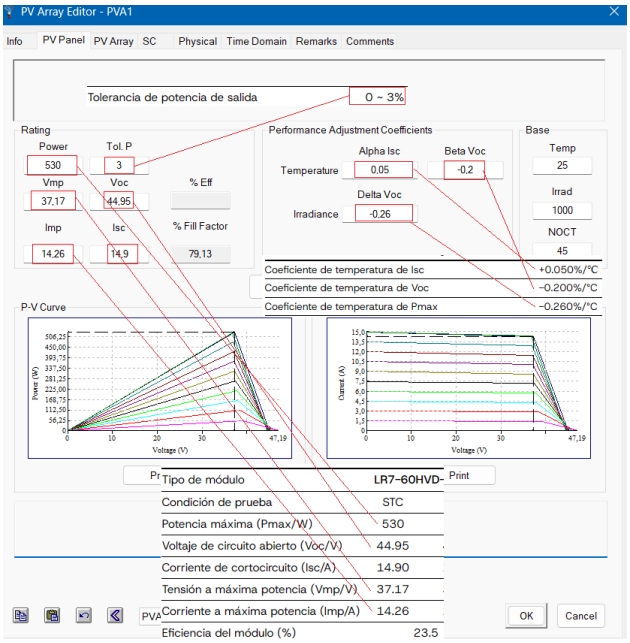


Figura 12: Definición de parametros eléctricos en panel solar, Fuente: Elaboración Propia a partir del Software ETAP

Una vez definidas las características eléctricas de un módulo fotovoltaico, se procede a configurar el arreglo fotovoltaico desde el apartado PV Array de la interfaz del panel solar en ETAP. En esta sección se establece la cantidad de módulos conectados en serie por cada string y el número total de strings conectados en paralelo que conforman el generador fotovoltaico. Para el presente caso, se configuró un arreglo compuesto por 14 strings, cada uno integrado por 18 módulos fotovoltaicos conectados en serie. Es importante destacar que la configuración del arreglo fotovoltaico depende de las características eléctricas del inversor seleccionado, particularmente de su rango de tensión de entrada, la corriente máxima admisible por cada seguidor del punto de máxima potencia (MPPT) y su capacidad nominal de generación. Por esta razón, el número de módulos por string y la cantidad de strings en paralelo deben definirse de acuerdo con las especificaciones técnicas del inversor y los criterios de diseño del sistema fotovoltaico.

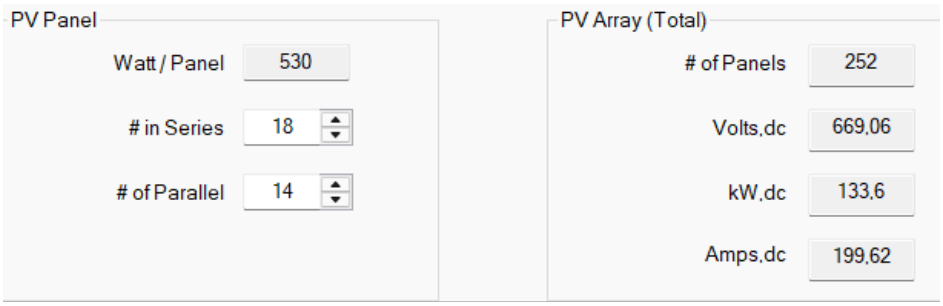


Figura 13: Definición de arreglo Fotovoltaico,Fuente: Elaboración Propia a partir del Software ETAP

5.3.2. Inversores

El inversor constituye uno de los componentes principales de un sistema fotovoltaico, ya que es el encargado de convertir la energía eléctrica en corriente continua (DC), proveniente de los módulos fotovoltaicos, en corriente alterna (AC), compatible con la red eléctrica o con las cargas conectadas. Su modelado en ETAP inicia con la incorporación del componente desde la biblioteca de equipos y la posterior configuración de sus parámetros eléctricos, los cuales se obtienen a partir de la ficha técnica suministrada por el fabricante. La correcta parametrización del inversor permite representar de manera adecuada su capacidad de conversión, los rangos de operación y las condiciones de conexión con el sistema fotovoltaico.



Figura 14: Ficha técnica Inversor, Fuente: Adaptado de ficha Huawei

Una vez obtenida la ficha técnica del inversor (Huawei Technologies Co., Ltd., 2021), se procede a realizar su caracterización dentro de ETAP mediante el ingreso de los parámetros eléctricos especificados por el fabricante. Entre los datos más relevantes se encuentran la potencia nominal, la tensión nominal de salida, el rango de tensión de entrada en corriente continua, la corriente máxima de entrada, el número de seguidores del punto de máxima potencia (MPPT), el número de entradas por MPPT y la eficiencia de conversión. La incorporación de estos parámetros permite que el modelo represente con precisión el comportamiento del inversor durante las simulaciones del sistema fotovoltaico.

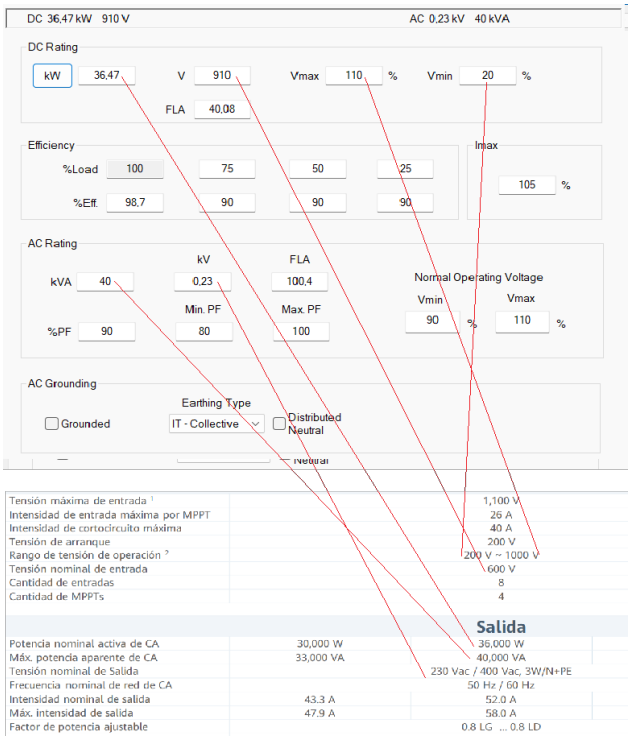


Figura 15: Caracterización de Inversor DC-AC, Fuente: Elaboración Propia a partir del Software ETAP

5.3.3. Conductores DC

El modelado de los conductores en corriente continua (DC) se realiza mediante la selección del elemento correspondiente desde la biblioteca de componentes de ETAP. Una vez incorporado al proyecto, se configuran sus características eléctricas y físicas, tales como el material del conductor, el calibre, el tipo de aislamiento, la longitud, el número de conductores por polo y el método de instalación. La correcta definición de estos parámetros permite representar adecuadamente las pérdidas eléctricas y la caída de tensión en el circuito de corriente continua, garantizando resultados confiables durante los análisis del sistema fotovoltaico.

El procedimiento para el modelado de los conductores en corriente continua (DC) es similar al empleado para los conductores en corriente alterna (AC). En ambos casos, se selecciona el conductor desde las bibliotecas disponibles en ETAP y se configuran parámetros como el material, el calibre, el tipo de aislamiento, la longitud y el método de instalación. La princi-

pal diferencia radica en la referencia comercial o el fabricante del conductor, ya que en los sistemas fotovoltaicos es común emplear cables diseñados específicamente para aplicaciones en corriente continua, cuyas características constructivas y de aislamiento cumplen con los requisitos propios de este tipo de instalaciones. Por lo tanto, el procedimiento de selección y parametrización es esencialmente el mismo, variando únicamente las especificaciones técnicas del conductor de acuerdo con el fabricante y la aplicación, a continuación se presenta un ejemplo de conductor DC para una aplicación en un sistema Fotovoltaico.

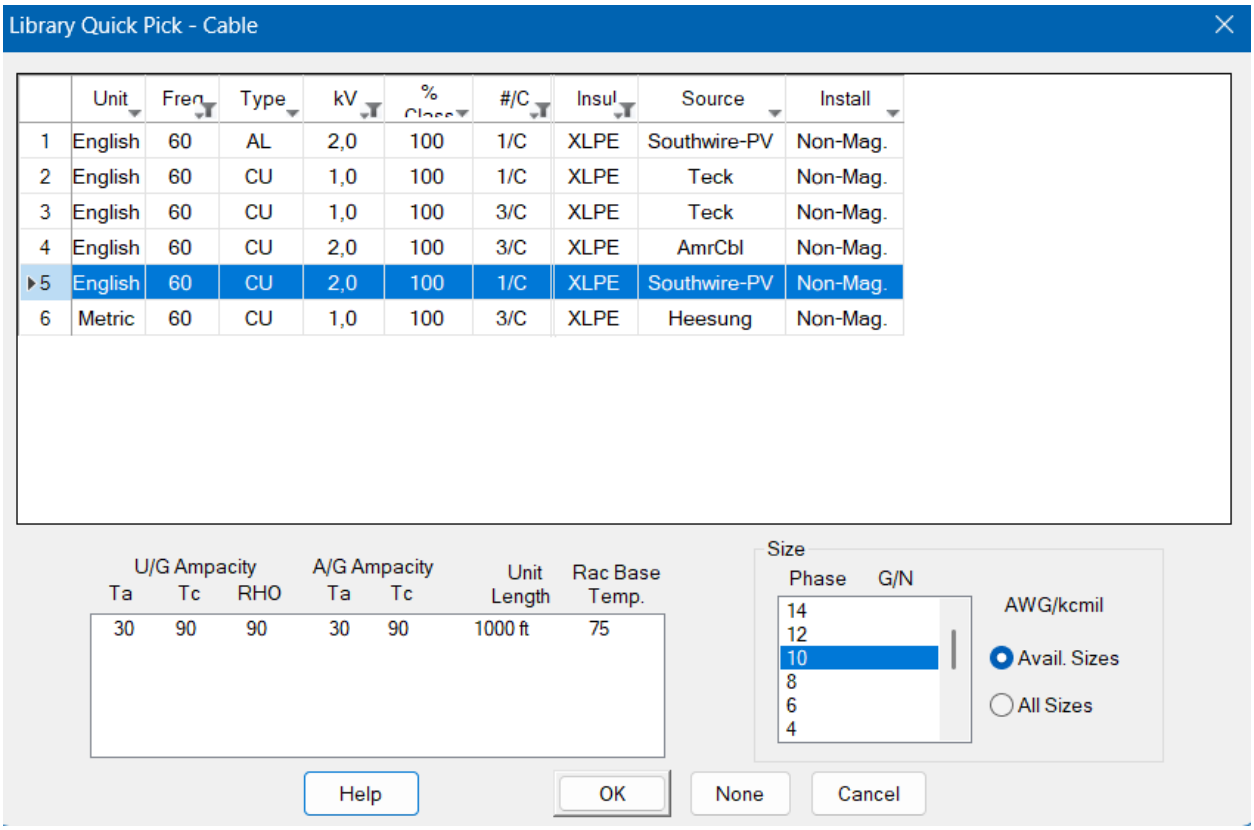


Figura 16: Características de conductor seleccionado, Fuente: Elaboración Propia a partir del Software ETAP

Cuadro 2: Características del conductor DC seleccionado desde la biblioteca de ETAP.

Parámetro	**Valor seleccionado**
Sistema de unidades	English
Frecuencia	60 Hz
Material del conductor	Cobre (CU)
Tensión nominal	2.0 kV
Clase de aislamiento	100 %
Número de conductores	1/C
Tipo de aislamiento	XLPE
Fabricante / Fuente	Southwire-PV
Método de instalación	Non-Mag.
Temperatura ambiente (subterráneo)	30 °C
Temperatura del conductor (subterráneo)	90 °C
Resistividad térmica del suelo (RHO)	90
Temperatura ambiente (aire)	30 °C
Temperatura del conductor (aire)	90 °C
Longitud base	1000 ft
Temperatura base para resistencia AC	75 °C
Calibre seleccionado	10 AWG

En la Tabla 2 se presentan las características del conductor seleccionado para el circuito de corriente continua. Aunque ETAP solicita la definición de una frecuencia nominal de **60 Hz**, este parámetro corresponde a un campo general de la biblioteca de conductores y no influye en el comportamiento eléctrico de un circuito en corriente continua. Para este caso se seleccionó un conductor de **6 mm^2**, equivalente aproximadamente a **10 AWG**, con aislamiento tipo **XLPE** y una tensión nominal de **2 kV**, características ampliamente utilizadas en instalaciones fotovoltaicas debido a su capacidad para soportar las condiciones de operación del lado de corriente continua, ofreciendo un adecuado nivel de aislamiento y resistencia frente a las condiciones ambientales propias de este tipo de sistemas.

Capítulo 6

Análisis Técnicos en ETAP

6.1. Flujo de Carga

Una vez completado el modelado de todos los componentes que conforman el sistema fotovoltaico, se procede a realizar el estudio de flujo de carga con el fin de evaluar el comportamiento eléctrico del sistema bajo condiciones normales de operación. Este análisis permite determinar la distribución de las potencias activa y reactiva, las corrientes que circulan por cada elemento, los niveles de tensión en las barras y las pérdidas de potencia presentes en la red.

En ETAP, el estudio de flujo de carga se ejecuta mediante el módulo Load Flow, el cual resuelve el estado estacionario del sistema considerando las características eléctricas de cada uno de los equipos previamente modelados. Para la simulación se verifican las condiciones de operación de los generadores fotovoltaicos, inversores, transformadores, conductores y cargas, con el propósito de garantizar que todos los elementos operen dentro de sus límites nominales.

Los resultados obtenidos permiten validar el diseño del sistema fotovoltaico, identificar posibles sobrecargas, caídas de tensión o pérdidas excesivas y comprobar el adecuado dimensionamiento de los equipos. En las siguientes secciones se describe el procedimiento empleado para la ejecución de la simulación y se analizan los principales resultados obtenidos a partir del estudio de flujo de carga.

Es importante resaltar que ETAP dispone de módulos independientes para la realización de estudios de flujo de carga en sistemas de corriente continua (DC) y corriente alterna (AC). Esta diferenciación permite analizar de forma específica el comportamiento de cada parte del sistema fotovoltaico, considerando las características propias de cada tipo de red. En el lado de corriente

continua se evalúan variables como las tensiones, corrientes y pérdidas entre los módulos fotovoltaicos y los inversores, mientras que en el lado de corriente alterna se analiza el comportamiento de los inversores, transformadores, conductores y cargas conectadas a la red eléctrica. De esta manera, es posible obtener una representación más precisa del funcionamiento global del sistema y verificar el cumplimiento de las condiciones de operación tanto en la etapa de generación como en la de distribución de la energía.

6.1.1. Flujo DC

El estudio de flujo de carga en corriente continua tiene como objetivo evaluar el comportamiento eléctrico del lado DC del sistema fotovoltaico, comprendido entre los módulos fotovoltaicos y la entrada de los inversores. Este análisis permite determinar las tensiones y corrientes de operación de los arreglos fotovoltaicos, así como las pérdidas de potencia ocasionadas por los conductores y demás elementos presentes en esta etapa del sistema.

En ETAP, el flujo de carga DC se ejecuta mediante el módulo específico para sistemas en corriente continua, el cual utiliza las características eléctricas previamente definidas para los módulos fotovoltaicos, los conductores DC y los inversores. Durante la simulación, el software calcula el punto de operación del generador fotovoltaico considerando las condiciones nominales establecidas en el modelo, permitiendo verificar que los niveles de tensión y corriente se encuentren dentro de los rangos de operación admisibles para el inversor y los demás componentes del sistema.

Los resultados obtenidos permiten validar el diseño del sistema fotovoltaico, identificar posibles caídas de tensión en los conductores, estimar las pérdidas de potencia en el lado DC y comprobar que la configuración de los módulos en serie y de los strings en paralelo sea compatible con las especificaciones técnicas del inversor seleccionado.

A continuación, se presenta el modelo del sistema fotovoltaico en corriente continua (DC) y (AC) empleado para el estudio de flujo de carga. El sistema está conformado un sistema que modela una red Fotovoltaica con 112 Strings cada uno de 30 Paneles para un total de 3360 Paneles solares de 600Wp DC, junto con dos inversores modelados cada uno con una capacidad de 1MW.

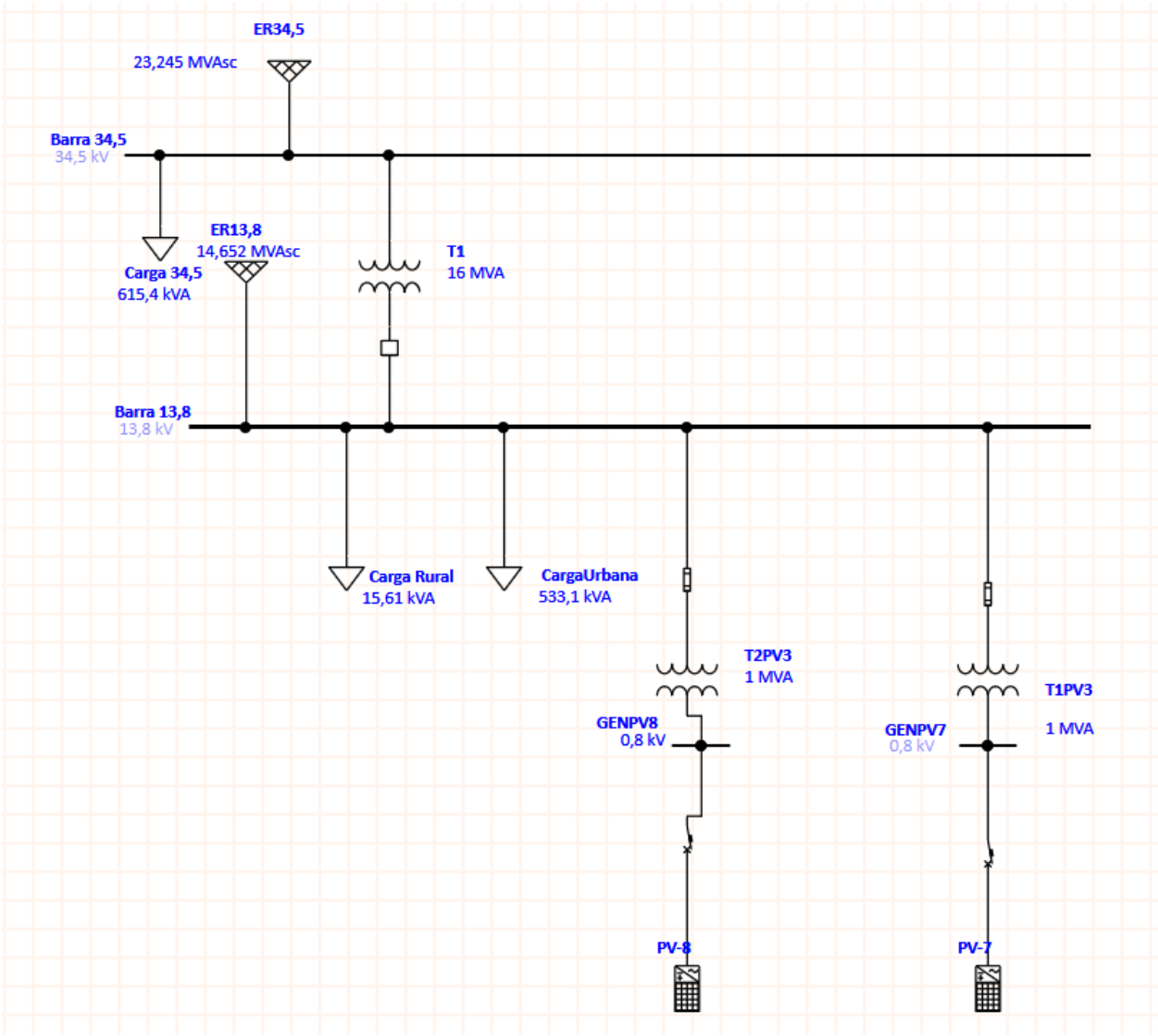


Figura 17: Red FV de Ejemplo para Flujo DC, Fuente: Elaboración Propia a partir del Software ETAP

La configuración presentada en la Figura 17 corresponde al modelo completo del sistema fotovoltaico implementado en ETAP, el cual integra tanto la etapa de corriente continua (DC) como la de corriente alterna (AC). Este modelo constituye la base para la realización de los diferentes estudios eléctricos desarrollados en el presente trabajo.

En primera instancia, se ejecuta el estudio de flujo de carga en corriente continua (DC), cuyo objetivo es determinar las condiciones de operación de los módulos fotovoltaicos, los arreglos

(strings), los conductores y la entrada de los inversores. Entre los principales resultados obtenidos se encuentran la distribución de tensiones, las corrientes de operación, la potencia suministrada por los arreglos fotovoltaicos y las pérdidas presentes en los conductores del lado DC.

Para ejecutar este análisis en ETAP, se selecciona el módulo DC Load Flow y se configuran las opciones de simulación correspondientes, tal como se muestra a continuación.

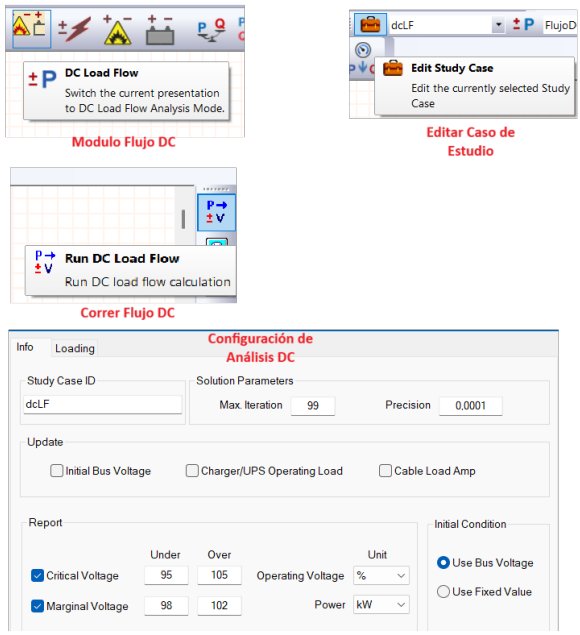


Figura 18: Configuración y selección para flujo DC. Fuente: Elaboración propia a partir del Software ETAP

A continuación se presentan los resultados obtenidos del flujo DC.

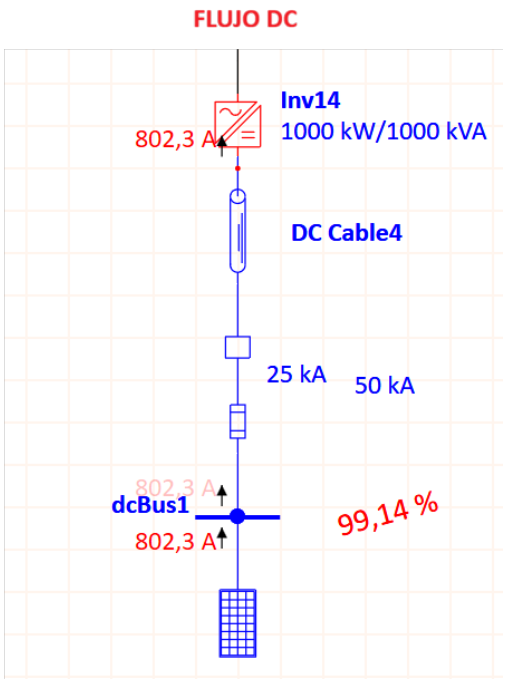


Figura 19: Resultados de Flujo DC, Fuente: Elaboración Propia a partir de Software ETAP

6.1.2. Flujo Ac

El estudio de flujo de carga en corriente alterna tiene como objetivo evaluar el comportamiento eléctrico del sistema desde la salida de los inversores hasta el punto de conexión con la red o las cargas. Este análisis permite determinar la distribución de las potencias activa y reactiva, los niveles de tensión en las barras, las corrientes que circulan por los conductores y transformadores, así como las pérdidas de potencia presentes en la red de corriente alterna.

En ETAP, el flujo de carga AC se ejecuta mediante el módulo Load Flow, el cual emplea la información previamente definida para los inversores, transformadores, conductores, barras y cargas del sistema. Durante la simulación, el software resuelve el estado estacionario de la red eléctrica, permitiendo verificar que cada uno de los equipos opere dentro de sus límites nominales y que los niveles de tensión, corriente y potencia cumplan con los criterios de diseño establecidos.

Los resultados obtenidos permiten validar el correcto dimensionamiento de los equipos del sistema fotovoltaico, identificar posibles sobrecargas, caídas de tensión y pérdidas en la red de distribución, además de verificar el adecuado intercambio de potencia entre los inversores y el sistema eléctrico en corriente alterna.

Para el presente estudio se emplea el mismo modelo desarrollado para el análisis del flujo de carga en corriente continua, considerando la etapa de conversión mediante dos inversores, cada uno con una capacidad nominal de 1 MW. En el lado de corriente alterna, el sistema fotovoltaico se conecta inicialmente a un transformador elevador trifásico de 1 MVA, con una relación de transformación 0,8/13,8 kV, cuya función es elevar el nivel de tensión de salida de los inversores para su integración con la red de distribución en media tensión.

El barraje principal de 13,8 kV se encuentra conectado a un equivalente de red con una capacidad de cortocircuito de 15 MVA, el cual representa el sistema eléctrico al que se integra la planta fotovoltaica. Asimismo, desde este mismo barraje se alimentan dos cargas representativas de una red de distribución: una carga urbana de 533 kVA y una carga rural de 15,61 kVA, permitiendo evaluar el comportamiento del sistema bajo condiciones típicas de operación.

Adicionalmente, el barraje de 13,8 kV se encuentra interconectado mediante un transformador trifásico de 16 MVA, con una relación de transformación 34,5/13,8 kV, hacia un segundo barraje de 34,5 kV. En este nivel de tensión se modela una carga de 615 kVA y un equivalente de red con una capacidad de 23,24 MVA, representando la conexión con un sistema de distribución de mayor capacidad.

Esta configuración constituye una representación simplificada de una red de distribución en media tensión (MT), permitiendo evaluar la interacción del sistema fotovoltaico con la infraestructura eléctrica existente, así como el comportamiento de los transformadores, conductores, cargas y barras durante la ejecución de los estudios de flujo de carga en corriente alterna.

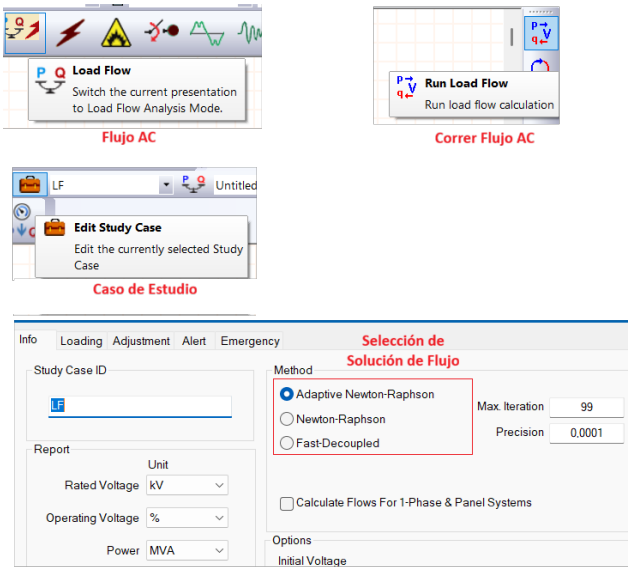


Figura 20: Configuración y selección para flujo AC, Fuente: Elaboración propia a partir del Software ETAP

Posteriormente a la configuración para flujo AC, se realiza el respectivo analisis del comportamiento del sistema.

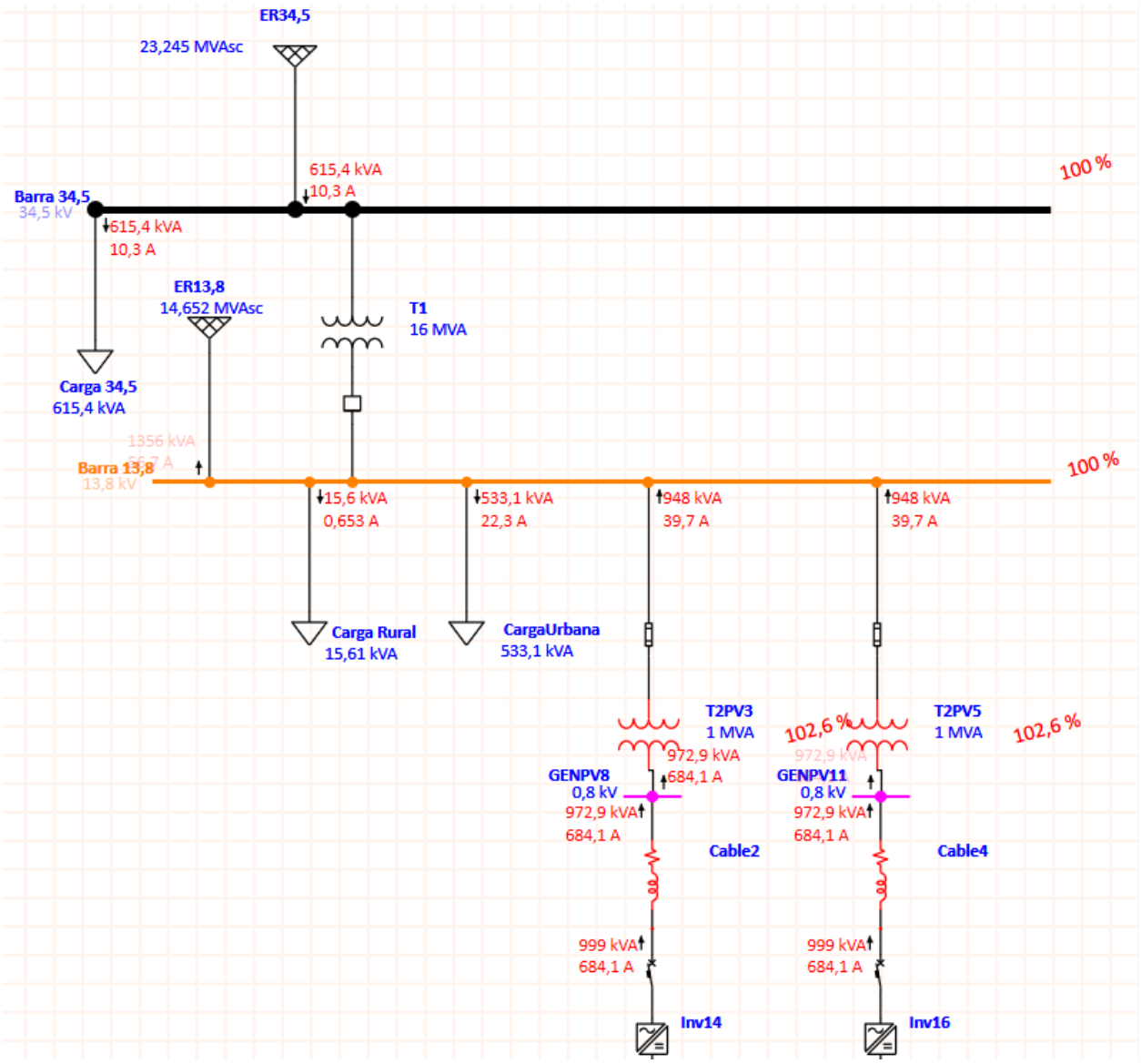


Figura 21: Resultados de Flujo AC, Fuente: Elaboración Propia a partir de Software ETAP

La Figura 21 presenta los resultados obtenidos del estudio de flujo de carga en corriente alterna para el sistema fotovoltaico modelado en ETAP. En ella se observa la distribución de la potencia suministrada por los inversores hacia la red de media tensión, así como las condiciones de operación de los transformadores, conductores y cargas conectadas al sistema.

De acuerdo con los resultados obtenidos, cada inversor entrega aproximadamente 999 kVA al sistema, valor que, considerando las pérdidas en los conductores y el transformador elevador,

corresponde a una potencia cercana a 972,9 kVA en el lado de 13,8 kV. Asimismo, se evidencia que los transformadores elevadores operan con una carga aproximada del $102,6$, condición que indica una ligera sobrecarga respecto a su potencia nominal de 1 MVA. Este comportamiento se debe a la potencia suministrada por los inversores y constituye un aspecto importante a considerar durante el proceso de dimensionamiento de los equipos.

En el barraje de 13,8 kV se observa el suministro de energía hacia las cargas locales, correspondientes a una carga urbana de 533,1 kVA y una carga rural de 15,61 kVA, mientras que el excedente de potencia es intercambiado con la red de distribución representada mediante el equivalente de red. Por otra parte, el transformador de 16 MVA permite la transferencia de potencia entre los niveles de tensión de 13,8 kV y 34,5 kV, alimentando la carga conectada en este último nivel y manteniendo el equilibrio energético del sistema.

En términos generales, los resultados del flujo de carga muestran que el sistema fotovoltaico es capaz de suministrar la demanda de las cargas conectadas y de inyectar potencia hacia la red de distribución. Sin embargo, el porcentaje de carga observado en los transformadores elevadores sugiere la conveniencia de revisar su dimensionamiento o las condiciones de operación del sistema, con el fin de evitar sobrecargas permanentes que puedan afectar la vida útil de los equipos.

6.2. Análisis de Cortocircuito

Una vez verificado el comportamiento del sistema fotovoltaico mediante el estudio de flujo de carga, se procede a realizar el análisis de cortocircuito con el propósito de evaluar la respuesta del sistema ante condiciones de falla. Este estudio permite determinar las corrientes de cortocircuito que pueden presentarse en los diferentes niveles de tensión, información fundamental para el dimensionamiento y la coordinación de los dispositivos de protección, así como para la verificación de la capacidad de interrupción de los equipos eléctricos.

En ETAP, el análisis de cortocircuito se desarrolla empleando las características eléctricas previamente definidas para los transformadores, conductores, barras, inversores, cargas y equivalentes de red. A partir de estos parámetros, el software calcula las corrientes de falla de acuerdo con la norma de análisis seleccionada, considerando el aporte de cada una de las fuentes de generación y de la red eléctrica.

Los resultados obtenidos permiten identificar los niveles máximos y mínimos de corriente de cortocircuito en cada barra del sistema, verificar la capacidad soportada por los equipos y evaluar el comportamiento de la red ante diferentes tipos de falla. En las siguientes secciones se presenta el procedimiento empleado para la ejecución de este estudio y el análisis de los resultados obtenidos para el sistema fotovoltaico modelado.

Para la configuración de las características de corto, se realiza entonces un análisis tanto en DC como en AC, esto permite identificar los parámetros de corrientes y la coordinación de protecciones correspondiente para cada caso.

6.2.1. Corto Circuito DC

El análisis de cortocircuito en corriente continua tiene como finalidad evaluar el comportamiento del sistema fotovoltaico ante la ocurrencia de fallas en el lado DC, comprendido entre los módulos fotovoltaicos y la entrada de los inversores. Este estudio permite determinar las corrientes de falla que pueden presentarse en los conductores, cajas combinadoras y demás elementos del circuito de corriente continua, constituyendo una herramienta fundamental para el dimensionamiento de los dispositivos de protección y la verificación de la capacidad de los equipos instalados.

En ETAP, el análisis de cortocircuito DC se realiza utilizando el módulo específico para sistemas de corriente continua, el cual considera las características eléctricas previamente definidas para los módulos fotovoltaicos, los conductores, las protecciones y los inversores. Durante la simulación, el software calcula la contribución de corriente de cada arreglo fotovoltaico hacia el punto de falla, permitiendo identificar los niveles máximos de corriente y evaluar el comportamiento del sistema bajo condiciones anormales de operación.

Los resultados obtenidos permiten verificar la capacidad de los conductores y dispositivos de protección para soportar las corrientes de cortocircuito, así como identificar posibles riesgos asociados a sobrecorrientes en el lado de corriente continua. De igual manera, este estudio facilita la selección adecuada de fusibles, interruptores y demás equipos de protección, garantizando la seguridad y confiabilidad del sistema fotovoltaico.

Para el presente trabajo, el análisis de cortocircuito DC se realizó sobre el modelo previamente desarrollado para el flujo de carga, utilizando las características eléctricas definidas para los módulos fotovoltaicos, los arreglos (strings), los conductores y los inversores, con el propósito de

evaluar la respuesta del sistema ante diferentes escenarios de falla en corriente continua.

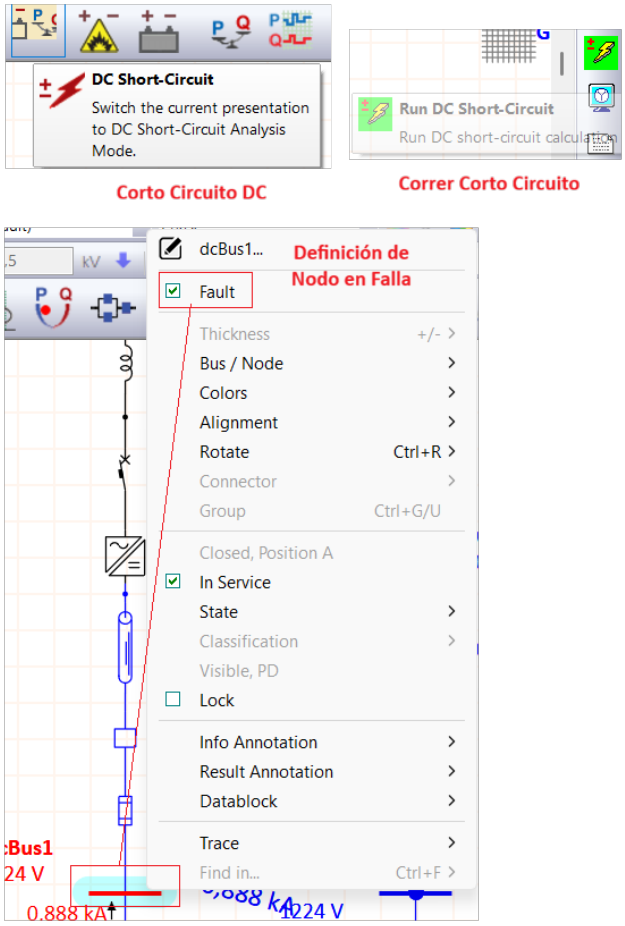


Figura 22: Configuración de Parametros para Corto Circuito DC, Fuente: Elaboración Propia a partir de Software ETAP

En la figura 22 se presenta la configuración necesaria para desarrollar un analisis de corto circuito en DC, cabe resaltar que se especifica que se debe seleccionar un nodo, bus o barraje, y marcar posteriormente Fault, ya que el software lo exige para determinar en que punto se hace la falla.

posteriormente podemos hacer una coordinación de protecciones basados en la información de corto Circuito obtenidas.

Coordinación de Protecciones DC

La coordinación de protecciones en corriente continua tiene como propósito garantizar la detección y el despeje selectivo de las fallas que puedan presentarse en el lado DC del sistema fotovoltaico, minimizando el impacto sobre el resto de la instalación y preservando la continuidad del servicio. Para ello, es necesario que los dispositivos de protección operen de forma coordinada, asegurando que el equipo más cercano al punto de falla actúe antes que los dispositivos ubicados aguas arriba.

En sistemas fotovoltaicos, la coordinación de protecciones adquiere especial importancia debido a las características propias de los módulos fotovoltaicos como fuentes de corriente, cuya capacidad de aporte a una falla difiere de la de las fuentes convencionales de corriente alterna. Por esta razón, la selección y el ajuste de fusibles, interruptores y demás dispositivos de protección deben realizarse considerando las corrientes máximas de operación, las corrientes de cortocircuito y las condiciones de funcionamiento establecidas por el fabricante de los equipos.

En ETAP, la coordinación de protecciones DC se lleva a cabo utilizando los resultados obtenidos en el análisis de cortocircuito y las características de los dispositivos de protección previamente modelados. Esto permite verificar que las curvas tiempo-corriente de los diferentes equipos mantengan una adecuada selectividad, garantizando la protección de los módulos fotovoltaicos, los conductores y los inversores frente a condiciones de sobrecorriente o cortocircuito.

En las siguiente imagén se presenta los criterios empleados para la selección y coordinación de las protecciones del sistema fotovoltaico, así como el análisis de las curvas de operación obtenidas durante la simulación.

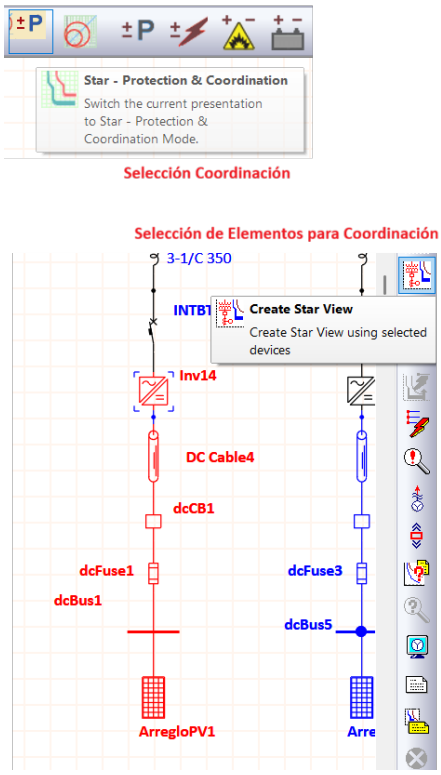


Figura 23: Configuración de parámetros para Coordinación, Fuente: Elaboración Propia a partir de Software ETAP.

Posteriormente a la configuración de los parámetros de coordinación, se realiza entonces la respectiva coordinación de protecciones esto con el fin de garantizar una correcta operación de protecciones a partir de las características de cortocircuito obtenidas en la simulación de Corto Circuito.

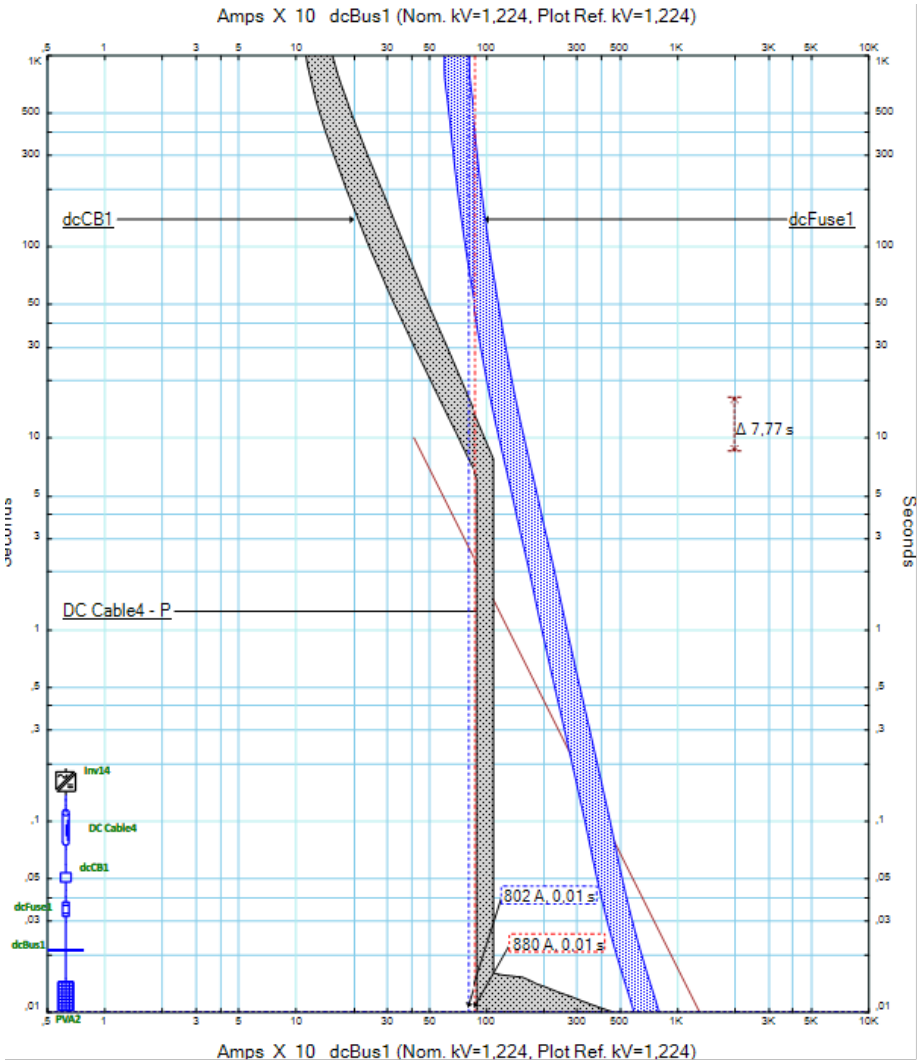


Figura 24: Coordinación de Protecciones DC, Fuente: Elaboración propia a partir del Software ETAP

La Figura 24 presenta la curva de coordinación de protecciones del lado de corriente continua del sistema fotovoltaico, obtenida mediante el módulo **Star – Protective Device Coordination de ETAP**. En esta gráfica se representan las curvas tiempo-corriente del interruptor dcCB1, el fusible dcFuse1 y la capacidad térmica del conductor DC Cable4, permitiendo verificar la selectividad y la adecuada protección de los elementos que conforman el circuito DC.

Como se observa, la corriente nominal de operación del circuito es de aproximadamente 800 A, condición bajo la cual los dispositivos de protección permanecen en estado estable sin producir disparos indeseados durante el funcionamiento normal del sistema. Por otra parte, el estudio de

cortocircuito determina una corriente máxima de falla cercana a 880 A, valor que se encuentra representado sobre la curva de coordinación.

La diferencia entre la corriente de operación y la corriente de cortocircuito es relativamente pequeña, lo cual es un comportamiento característico de los sistemas fotovoltaicos. A diferencia de las redes convencionales de corriente alterna, los módulos fotovoltaicos presentan una capacidad limitada para suministrar corriente durante una falla, razón por la cual la corriente de cortocircuito suele ser únicamente entre 1,1 y 1,3 veces la corriente nominal de operación.

De acuerdo con la coordinación obtenida, el interruptor dc dcCB1 es el primer dispositivo destinado a actuar ante una condición de falla, mientras que el fusible dcFuse-1 proporciona una protección de respaldo, garantizando la desconexión del circuito en caso de que el interruptor no opere correctamente. Asimismo, se verifica que la curva de operación de ambos dispositivos se mantiene dentro de los límites de protección del conductor, evitando que éste alcance condiciones térmicas que puedan comprometer su integridad durante un evento de cortocircuito.

En consecuencia, la coordinación de protecciones implementada permite asegurar una operación selectiva del sistema fotovoltaico, protegiendo los conductores, los módulos fotovoltaicos y la entrada del inversor frente a condiciones de sobrecorriente y cortocircuito.

6.2.2. Corto Circuito AC

El análisis de cortocircuito en corriente alterna tiene como objetivo evaluar la respuesta del sistema eléctrico ante la ocurrencia de fallas en la red AC, determinando los niveles de corriente que circulan por los diferentes elementos del sistema durante una condición de cortocircuito. Este estudio constituye una herramienta fundamental para el dimensionamiento de equipos eléctricos, la selección de interruptores de potencia y la coordinación de los dispositivos de protección.

En ETAP, el análisis de cortocircuito se realiza mediante el módulo *Short Circuit*, el cual calcula las corrientes de falla utilizando las características eléctricas previamente definidas para los transformadores, conductores, barras, cargas, equivalentes de red e inversores. Dependiendo de la norma de cálculo seleccionada, el software determina las corrientes simétricas y asimétricas de falla, permitiendo evaluar el comportamiento del sistema bajo diferentes escenarios.

Para el presente estudio se analizan las corrientes de cortocircuito en los principales barrajes del sistema de media tensión, con el propósito de verificar que los equipos instalados posean una

capacidad de interrupción superior a las corrientes de falla calculadas. Asimismo, los resultados obtenidos sirven como base para la coordinación de protecciones en corriente alterna, garantizando que los dispositivos de protección operen de manera selectiva y dentro de los tiempos establecidos para cada condición de falla.

En las siguientes figuras se presentan los resultados del análisis de cortocircuito obtenidos para el sistema fotovoltaico modelado, mostrando los niveles de corriente de falla en los diferentes puntos de la red y su influencia sobre los equipos eléctricos que conforman el sistema, inicialmente se muestra como se configuran los parametros de CortoCircuito en AC.

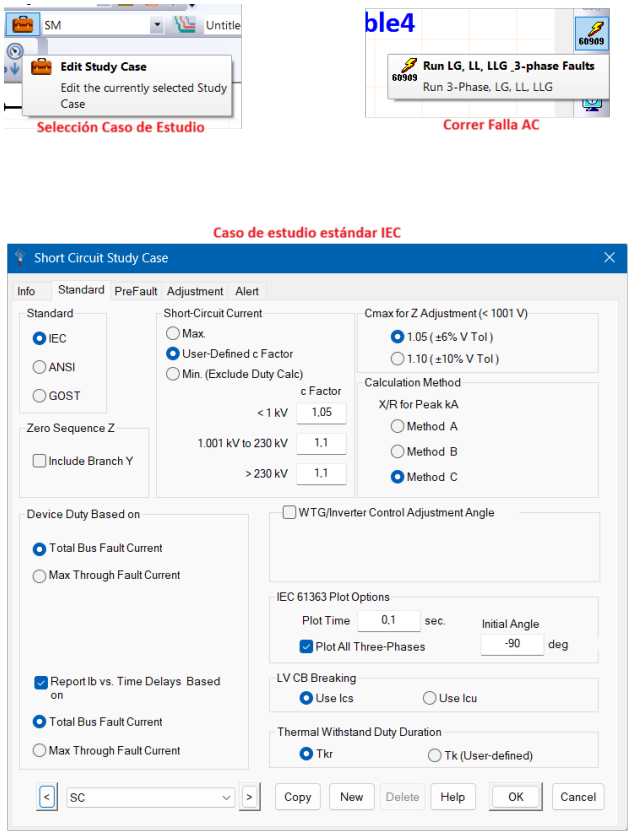


Figura 25: Configuración para Corto Circuito AC, Fuente: Elaboración Propia a partir de Software ETAP.

Posteriormente al ajuste de los parametros de cortocircuito en AC vistos en la figura 25, se puede realizar respectivamente el analisis de corto circuito de forma tal que se obtienen los siguientes resultados.

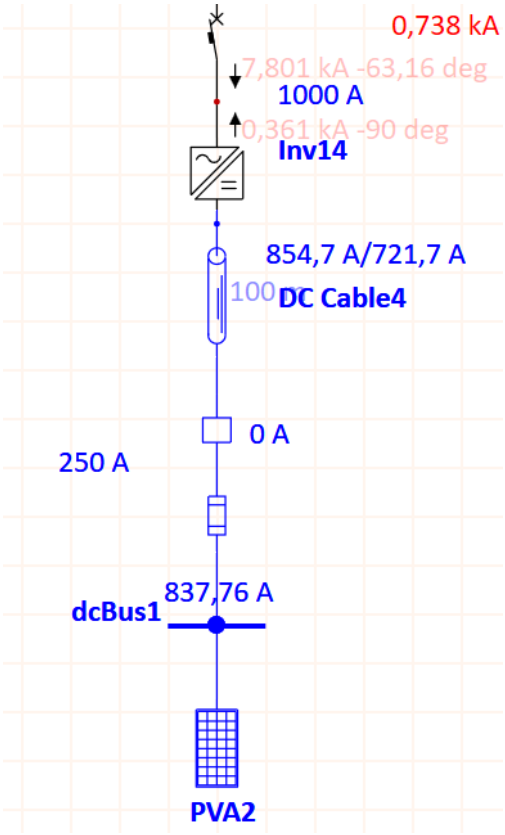


Figura 26: Resultados de Corto Circuito AC, Fuente:Elaboración propia a partir de Software ETAP.

La figura anterior presenta los resultados obtenidos del análisis de cortocircuito en corriente alterna para uno de los ramales que conectan el inversor con el transformador elevador. En ella se observan las corrientes que circulan por los diferentes elementos del sistema durante la condición de falla, así como la contribución del inversor al cortocircuito.

Durante la simulación de cortocircuito, ETAP determina una corriente de falla de aproximadamente 0,361 kA, la cual corresponde a la contribución del inversor al punto de falla analizado. A diferencia de las fuentes convencionales conectadas directamente a la red, los inversores fotovoltaicos limitan electrónicamente su corriente de salida durante eventos de cortocircuito, por lo que su aporte a la falla es considerablemente menor que el de una fuente síncrona o un equivalente de red.

A su vez la red equivalente completa presente al principio del sistema entrega en modo de corto circuito una corriente de 7,801kA, esto es un valor extremadamente alto sin embargo, este es el aporte que genera toda la red.

Estos resultados permiten verificar que el comportamiento del inversor es consistente con las características de los convertidores electrónicos de potencia utilizados en sistemas fotovoltaicos. Asimismo, constituyen la base para el estudio de coordinación de protecciones, ya que permiten comprobar que los dispositivos de protección seleccionados sean capaces de detectar y despejar la falla considerando la limitada contribución de corriente suministrada por el inversor y la red Equivalente.

Coordinación de Protecciones AC

La coordinación de protecciones en corriente alterna tiene como objetivo garantizar la operación selectiva de los dispositivos de protección ante condiciones de sobrecorriente o cortocircuito en la red AC del sistema fotovoltaico. Para ello, es necesario que cada dispositivo actúe de forma coordinada con los demás, de manera que la falla sea despejada por el elemento de protección más cercano al punto donde se origina, evitando la desconexión innecesaria de otras partes del sistema y garantizando la continuidad del suministro eléctrico.

En el lado de corriente alterna, la coordinación involucra los interruptores de potencia, relés de protección, fusibles y demás dispositivos instalados entre la salida de los inversores, los transformadores elevadores y el punto de conexión con la red de distribución. La correcta selección y ajuste de estos equipos permite proteger los conductores, transformadores, barras y cargas frente a sobrecargas y corrientes de cortocircuito, preservando la integridad de los equipos y asegurando una operación confiable del sistema.

En ETAP, la coordinación de protecciones AC se realiza mediante el módulo *Star – Protective Device Coordination*, el cual permite construir las curvas tiempo-corriente (TCC) de los dispositivos de protección y compararlas con las curvas térmicas de los conductores y las características de operación de los transformadores. A partir de este análisis es posible verificar la selectividad entre los diferentes dispositivos, comprobar que los tiempos de despeje sean adecuados y validar que ningún equipo opere por encima de sus límites de diseño durante una condición de falla.

Para la coordinación de protecciones en AC es posible realizar la coordinación automática de forma que se selecciona la opcion presente a continuación.

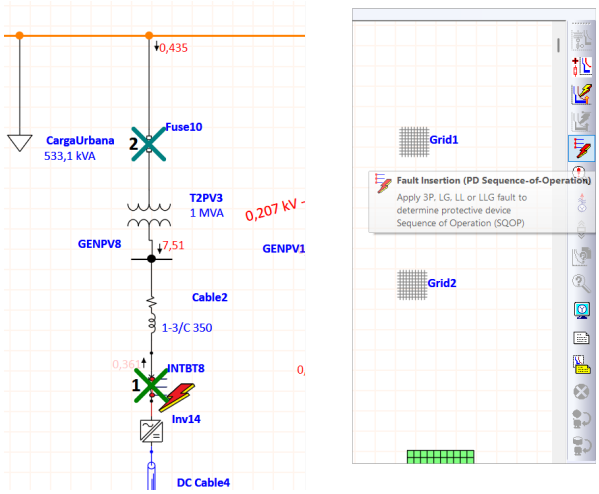


Figura 27: Secuencia de Operación de Protecciones AC, Fuente: Elaboración Propia a partir de Software ETAP

En la figura 27 se observa la secuencia de disparo de las protecciones presentes despues del inversor, para ello entonces el numero 1 corresponde a la protección que actua en primera instancia, y en consecuencia si esta no actua posteriormente actuaria la numero 2, esta opción de coordinación o secuencia de operación solo se encuentra disponible para su utilización en AC, En las siguientes figuras se presentan las curvas de coordinación obtenidas para los principales dispositivos de protección del sistema en AC, junto con el análisis de su comportamiento frente a las corrientes nominales y de cortocircuito determinadas en los estudios anteriores.

6.3. Interpretación de Resultados

Los estudios desarrollados en ETAP permitieron evaluar el comportamiento eléctrico del sistema fotovoltaico bajo diferentes condiciones de operación, verificando tanto su desempeño en estado estable como su respuesta ante condiciones de falla. A partir de los resultados obtenidos en los análisis de flujo de carga, cortocircuito y coordinación de protecciones, fue posible validar el modelo implementado y comprobar el adecuado funcionamiento de los principales componentes del sistema.

El estudio de flujo de carga en corriente continua evidenció que la configuración de los arreglos fotovoltaicos y su conexión con los inversores cumplen con los criterios de diseño establecidos.

Los niveles de tensión y corriente obtenidos se mantuvieron dentro de los rangos de operación definidos por las especificaciones de los equipos, mientras que las pérdidas en los conductores fueron reducidas, indicando un adecuado dimensionamiento del sistema de generación en corriente continua.

Por su parte, el análisis de flujo de carga en corriente alterna permitió verificar la distribución de potencia desde los inversores hacia la red de media tensión y las cargas conectadas al sistema. Los resultados mostraron un comportamiento estable de la red y una correcta transferencia de energía a través de los transformadores y conductores. No obstante, se identificó que los transformadores elevadores de 1 MVA operan con un porcentaje de carga cercano al 102,6 %, condición que, aunque corresponde al escenario analizado, sugiere revisar el dimensionamiento del equipo o las condiciones de operación para garantizar un margen adecuado frente a futuras variaciones de carga o generación.

En el análisis de cortocircuito se observó que las corrientes de falla en el lado de corriente continua presentan un incremento reducido respecto a la corriente nominal de operación, comportamiento característico de los sistemas fotovoltaicos debido a la limitada capacidad de aporte de corriente de los módulos solares. Esta condición resalta la importancia de seleccionar dispositivos de protección específicos para aplicaciones en corriente continua, capaces de detectar y despejar fallas aun cuando las corrientes de cortocircuito no sean considerablemente superiores a las corrientes nominales.

Finalmente, el estudio de coordinación de protecciones demostró que los dispositivos de protección seleccionados presentan una adecuada selectividad, garantizando la operación del equipo más cercano al punto de falla y limitando la propagación de las sobrecorrientes hacia el resto del sistema. Asimismo, las curvas tiempo-corriente evidenciaron que los conductores permanecen protegidos dentro de sus límites térmicos, contribuyendo a la seguridad y confiabilidad de la instalación.

En conjunto, los resultados obtenidos permiten concluir que el modelo desarrollado en ETAP representa adecuadamente el comportamiento del sistema fotovoltaico y constituye una herramienta confiable para evaluar su desempeño eléctrico, validar criterios de diseño y analizar diferentes escenarios de operación y falla antes de la implementación del proyecto.

Capítulo 7

Aplicación en Caso de Estudio

7.1. Descripción del sistema

La consultoría energética es un proceso técnico orientado a evaluar las condiciones de operación de un sistema eléctrico con el fin de identificar oportunidades de mejora en términos de eficiencia, confiabilidad, seguridad y cumplimiento normativo. En Colombia, este tipo de estudios constituye una herramienta fundamental para el diseño, ampliación y modernización de instalaciones eléctricas, especialmente en proyectos de generación con fuentes no convencionales de energía renovable, donde es necesario verificar el comportamiento del sistema mediante análisis eléctricos que respalden las decisiones de ingeniería.

El desarrollo de una consultoría energética comprende actividades como la recopilación de información técnica, el levantamiento de la infraestructura existente, la elaboración del modelo eléctrico del sistema, la ejecución de estudios de flujo de carga, cortocircuito, coordinación de protecciones, calidad de potencia y estabilidad, así como la formulación de recomendaciones técnicas que permitan optimizar el desempeño de la instalación. Estos análisis deben realizarse conforme a la reglamentación técnica vigente, garantizando el cumplimiento de los requisitos establecidos para el diseño y operación segura de las instalaciones eléctricas.

En Colombia, estos procesos se encuentran enmarcados principalmente por el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (Ministerio de Minas y Energía, 2024), adoptado mediante la Resolución 40117 de 2024 del Ministerio de Minas y Energía, el cual establece los requisitos técnicos mínimos para garantizar la seguridad de las personas, la protección de la vida, la preservación del medio ambiente y la confiabilidad de las instalaciones eléctricas. Asimismo, los estudios asociados

a sistemas de potencia se apoyan en normas técnicas como la NTC 2050 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), 2020) y estándares internacionales de la serie IEEE, según la naturaleza del proyecto.

En este contexto, la presente consultoría corresponde al análisis de un sistema fotovoltaico desarrollado mediante el software ETAP (Electrical Transient Analyzer Program), herramienta especializada para el modelado, simulación y evaluación de sistemas eléctricos de potencia. A través de este software se construyó el modelo del sistema y se realizaron los estudios eléctricos requeridos para verificar su comportamiento operativo y su conformidad con los criterios técnicos establecidos en la normativa vigente.

Basados en la información del minimo de subsistencia identificado por algunos Operadores de red en Colombia se determino que para los estratos 1, 2 y 3, el minimo de subsistencia varia segun la altura sobre el nivel del mar, para ello se determina que en altura menores a los 1000 m.s.n.m corresponde a 173kWh mensual, y para aquellos sitios que se encuentren por encima de los 1000 m.s.n.m corresponde a un minimo de consumo de subsistencia de 130kWh mensual todo esto se acoge respectivamente a la ley 142 de 1994 (Congreso de Colombia, 1994).

El presente diagnóstico energético se desarrolla para una comunidad ubicada en el municipio de Garzón, departamento del Huila, cuya altitud promedio es de 830 m s. n. m.. Como criterio de diseño, se adopta un consumo correspondiente al mínimo vital de 173 kWh/mes por usuario, definido previamente para el dimensionamiento del sistema. Con base en este requerimiento, se establece una distribución de las cargas eléctricas considerando la potencia instalada (W), el tiempo de utilización y el consumo diario de energía (Wh). Dado que la comunidad está conformada por múltiples usuarios con características de consumo similares, en esta sección se presenta únicamente el perfil de carga de un usuario representativo. Este perfil sirve como base para la construcción de la curva típica de demanda y, posteriormente, para la estimación del comportamiento energético agregado de la comunidad y el dimensionamiento del sistema fotovoltaico. Los resultados se presentan a continuación.

Cuadro 3: Distribución de cargas del usuario representativo para el dimensionamiento del sistema fotovoltaico,Fuente: Elaboración Propia

Cantidad de Usuarios: 500												
Tipo de Carga	**Tipo de Conexión**	**Item**	**Equipo**	**Cantidad**	**Potencia (W)**	**Factor de uso**	**Potencia corregida (W)**	**Horas de uso (h)**	**Energía (Wh)**	**Energía mensual (kWh/mes)**	**Energía anual (kWh/año)**	**Energía por hora (Wh)**
AC	1ϕ	1	Iluminación	1	200	80 %	160	3	480	14.4	175.2	160
		2	Tomas	6	180	80 %	144	2	1728	51.8	630.72	864
		3	Lavadora	1	500	100 %	500	0.5	250	7.5	91.25	500
		4	Entretenimiento	1	100	80 %	80	3	240	7.2	87.6	80
		5	Tecnología	1	200	80 %	160	3.3	528	15.8	192.72	160
		6	Comunicaciones	1	100	80 %	80	3.5	280	8.4	102.2	80
		7	Refrigeración	1	300	80 %	240	9.5	2280	68.4	832.2	240
Procesos productivos	AC, 3ϕ	8	Proceso productivo + iluminación	1	100000	80 %	80000	12	960000	28800	350400	80000
Resumen												
Sumatoria de potencia cargas habituales (kW)				1.364		Sumatoria de energía cargas individuales (kWh/día)			5.786			
Sumatoria de energía cargas individuales (kWh/mes)				173.6								
Sumatoria de potencia procesos productivos (kW)				80		Sumatoria de energía procesos productivos (kWh/día)			960			

A partir del perfil de consumo definido para el usuario representativo y considerando una población beneficiaria de 500 usuarios residenciales, se realizó la proyección de la demanda energética de la comunidad. Esta estimación permite determinar los requerimientos de energía y potencia que deberán ser cubiertos por el sistema fotovoltaico, teniendo en cuenta tanto el consumo residencial como la demanda asociada a los procesos productivos comunitarios, las pérdidas técnicas del sistema y un margen de crecimiento representado mediante el Adicional por Administración, Operación y Mantenimiento (AOM). De esta manera, se obtiene una estimación de la demanda anual, la potencia máxima requerida y el consumo energético diario, parámetros fundamentales para el dimensionamiento de los equipos que conforman el sistema de generación.

Cuadro 4: Proyección de la demanda de la comunidad beneficiaria, Fuente: Elaboración propia basado en información dada por la Alcaldia.

Año	**2025**
Habitantes (Población beneficiada aproximada)	500
Cantidad de usuarios identificados	**500**
Cantidad de usuarios residenciales	500
Cantidad de usuarios comerciales	0
Cantidad de usuarios generales (Públicos)	0
Cantidad de emprendimientos	0
Demanda usuarios residenciales (MWh/año)	1038
Demanda usuarios comerciales (MWh/año)	0
Demanda usuarios generales (MWh/año)	0
Consumo emprendimientos (MWh/año)	0
Adicional por AOM (MWh/año)	208
Pérdidas de energía por año (MWh/año)	52
Energía Total CE (MWh/año)	**1298**
Potencia Máxima Estimada CE (kW)	**494**
Energía CE (kWh/día)	**3555**

A partir de la tabla podemos identificar que la potencia estimada Maxima para atender las necesidades de la Comunidad en Garzón es de 0.494MW, posteriormente se desea determinar un estimado de consumo diario de energia en los hogares correspondientes, por tanto a continuación se presenta un perfil de demanda diario con el fin de determinar aquellos momentos en los cuales se presenta un mayor consumo y horas de menor consumo respectivamente.

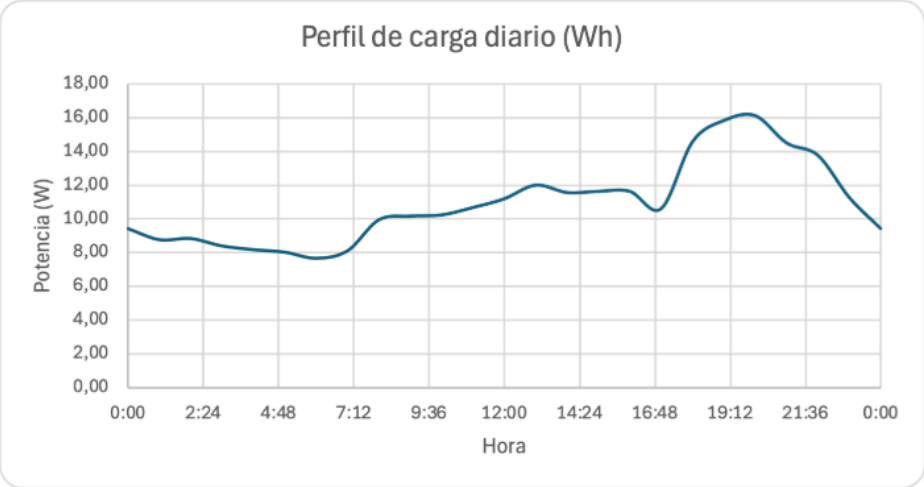


Figura 28: Perfil de Carga Diario, Fuente: Elaboración Propia

Posteriormente para el desarrollo de una propuesta energetica en funcion de la cantidad de usuarios, se determino un espacio destinado para la implementación de un proyecto solar con las siguientes caracteristicas:

Identificación y Viabilidad del Espacio:

- Espacio disponible: Sí.
- Tipo de superficie: Predio plano.
- Área total disponible (m²): 6973 m².
- Estado físico: Excelente.
- Distancia promedio entre usuarios: N/A.
- Distancia máxima entre la planta solar y el último usuario: N/A.

Basados en la información de los geovisores UPME (Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), 2026) respectivamente se puede identificar la irradiación solar promedio en este municipio con el fin de contar con datos adicionales que pueden ser importantes al momento de la producción de energía.

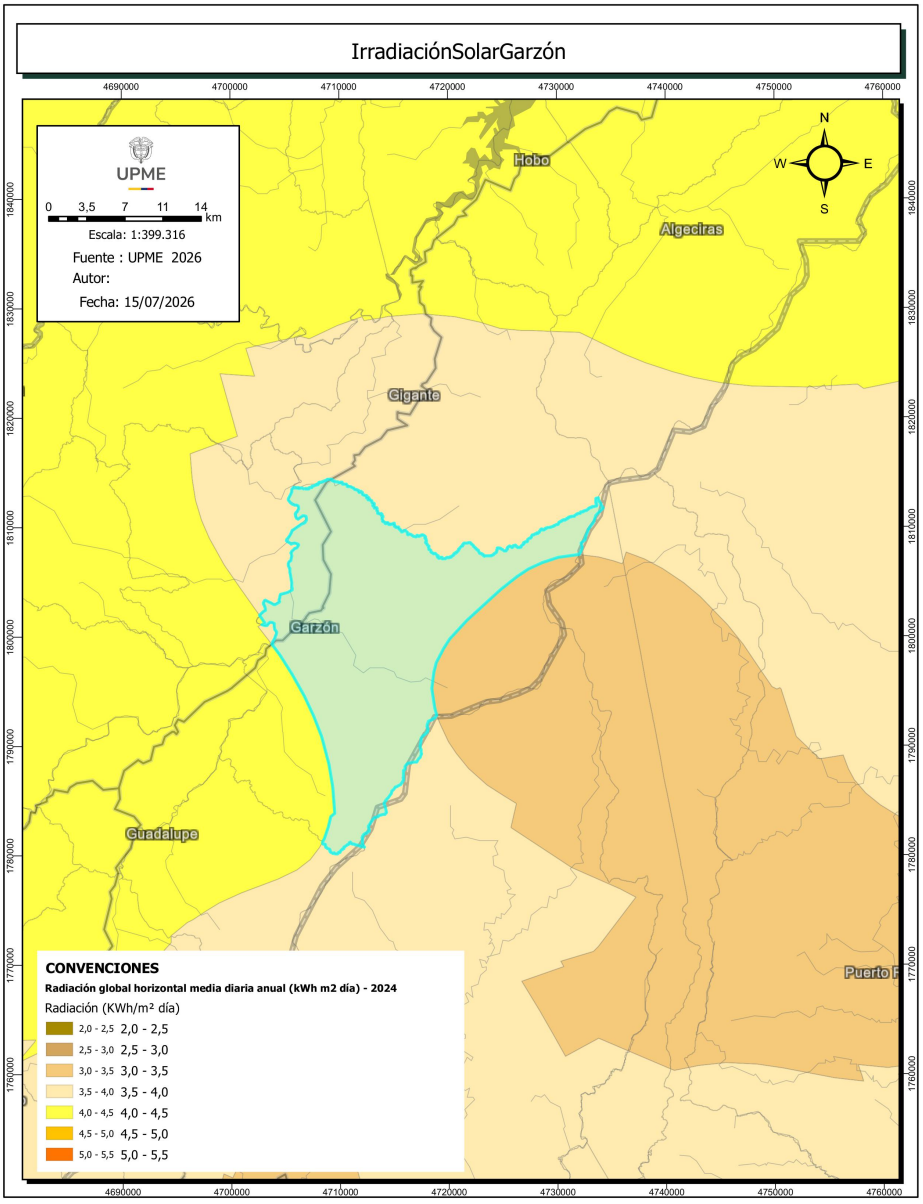


Figura 29: Irradiación en Garzón: Fuente: Adaptado de Geovisor UPME

En la figura 29, se observa que para el municipio de Garzón específicamente siendo el área de influencia en la cual se busca realizar el proyecto solar, se tiene una irradiación promedio de 4,0 kWh/m2xdia este dato brinda información relevante que permite concluir en términos de producción de energía basados en sistemas fotovoltaicos, que este lugar es un potencial para el desarrollo de una Minired solar Fotovoltaica.

7.1.1. Criterios Técnicos de Diseño

Dimensionamiento Solar de Modulos e Inversor

La evaluación del recurso solar se realizó mediante una simulación en el software PVsyst (PVsyst SA, 2026), una herramienta ampliamente utilizada para el diseño y análisis de sistemas fotovoltaicos. Este software permite estimar el potencial de generación de energía a partir de la disponibilidad del área de instalación, empleando bases de datos meteorológicas como Meteonorm para obtener información de irradiancia solar, temperatura y demás variables climáticas con resolución mensual o anual. Adicionalmente, PVsyst facilita la selección y configuración de los principales componentes del sistema, como los módulos fotovoltaicos y los inversores, permitiendo evaluar su desempeño energético y optimizar el diseño de la planta fotovoltaica de acuerdo con las condiciones específicas del sitio de estudio.

Para la respectiva evaluación se toma como referencia el valor que se tenia de 0,494MW basados en la cantidad de usuarios y un consumo promedio, a partir de ello tambien se evalua el terreno disponible anteriormente mencionado 6973 m² , a partir de ello se procede a realizar la configuración de dichos parametros en el cual es software permite de manera automatica determinar cantidades de paneles solares e inversores.

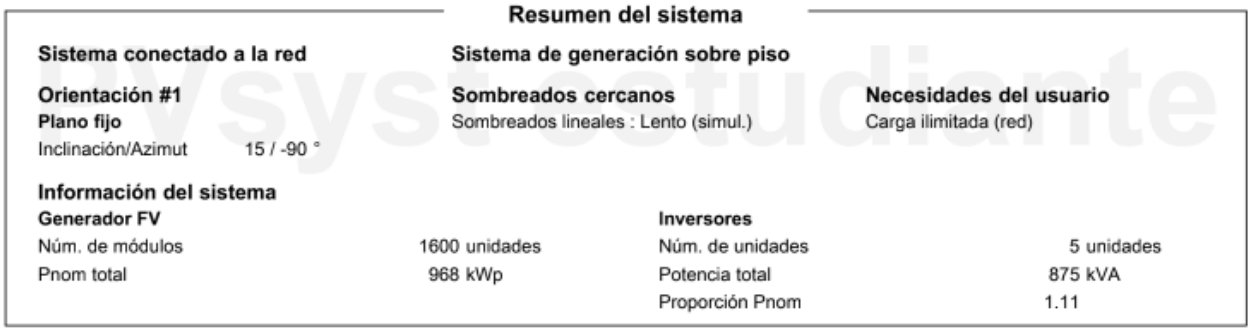


Figura 30: Dimensionamiento Solar basado en uso del suelo y ubicación: Adaptado de Software PVSyst

Como se puede observar el software arroja datos exactos de cantidad de módulos y cantidad de inversores, para este caso 1600 Modulos Fotovoltaicos y 5 inversores, a continuación las caracte-

risticas de catalogo seleccionadas, para la posterior configuración en el software ETAP.

Características del generador FV

Módulo PV		**Inversor**	
Fabricante	Generic	Fabricante	Generic
Modelo	JAM78-S30-605-MR	Modelo	SUN2000-185KTL-H1
(Base de datos PVsyst original)		(Base de datos PVsyst original)	
Unidad Nom. Potencia	605 Wp	Unidad Nom. Potencia	175 kVA
Número de módulos FV	1600 unidades	Número de inversores	5 unidades
Nominal (STC)	968 kWp	Potencia total	875 kVA
Módulos	64 cadena x 25 En serie	Voltaje de funcionamiento	550-1500 V
En cond. de funcionam. (50°C)		Potencia máx. (=>30°C)	185 kVA
Pmpp	884 kWp	Proporción Pnom (CC:CA)	1.11
U mpp	1022 V	Límite adelanto Cos(phi) mín	0.800
I mpp	865 A	Límite retardo Cos(phi) mín	0.800
		Reparto de potencia en este inversor	
Potencia FV total		**Potencia total del inversor**	
Nominal (STC)	968 kWp	Límite PNom del inversor definido como potencia aparente	
Total	1600 módulos	Potencia total	875 kVA
Área del módulo	4472 m²	Potencia máx.	925 kWca
Área celular	4134 m²	Número de inversores	5 unidades
		Proporción Pnom	1.11

PVsyst estudiante

Figura 31: Caracteristicas Especificas de Modulos e Inversores: Adapatado de software ETAP

identificados los componentes principales del sistema fotovoltaico, se procede a la caracterización del módulo fotovoltaico a partir de la información consignada en su ficha técnica. Para este proyecto se seleccionó el módulo JA Solar modelo JAM78S30-MR con una potencia nominal de 605 Wp, cuyas características eléctricas, mecánicas y de operación son empleadas para la configuración y simulación del sistema en PVsyst (JA Solar, 2026). Estos parámetros permiten representar de manera precisa el comportamiento del módulo bajo condiciones estándar de prueba (STC), garantizando una adecuada estimación del desempeño energético del sistema fotovoltaico.

ELECTRICAL PARAMETERS AT STC						
TYPE	JAM78S30 -580/MR	JAM78S30 -585/MR	JAM78S30 -590/MR	JAM78S30 -595/MR	JAM78S30 -600/MR	JAM78S30 -605/MR
Rated Maximum Power(Pmax) [W]	580	585	590	595	600	605
Open Circuit Voltage(Voc) [V]	53.11	53.20	53.30	53.40	53.50	53.61
Maximum Power Voltage(Vmp) [V]	44.35	44.56	44.80	45.05	45.30	45.53
Short Circuit Current(Isc) [A]	13.84	13.88	13.93	13.98	14.03	14.08
Maximum Power Current(Imp) [A]	13.08	13.13	13.17	13.21	13.25	13.29
Module Efficiency [%]	20.7	20.9	21.1	21.3	21.5	21.6
Power Tolerance	0~+5W					
Temperature Coefficient of Isc(α_Isc)	+0.045%°C					
Temperature Coefficient of Voc(β_Voc)	-0.275%/°C					
Temperature Coefficient of Pmax(γ_Pmp)	-0.350%/°C					
STC	Irradiance 1000W/m², cell temperature 25°C, AM1.5G					

Figura 32: Información eléctrica de panel solar 605Wp: Adaptado de catalogo JAM78S30 MR

En la figura 32, se puede identificar los parametros del panel solar, a continuación la implementación de dicho panel dentro del software de simulación ETAP:

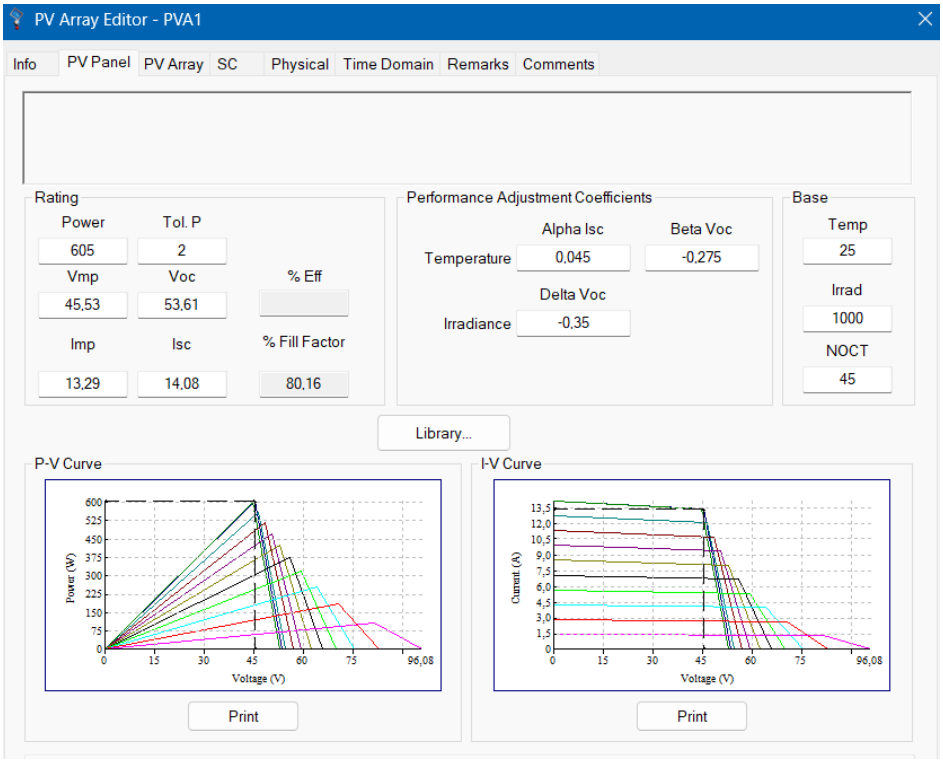


Figura 33: Configuración de Modulo Solar: Elaboración Propia a partir del Software ETAP

Una vez configurado la parte eléctrica es momento de identificar la cantidad de modulos correspondientes a cada inversor, para ello en la simulación en PVSyst da como resultado un modelo que especifica cada arreglo viendose asi:

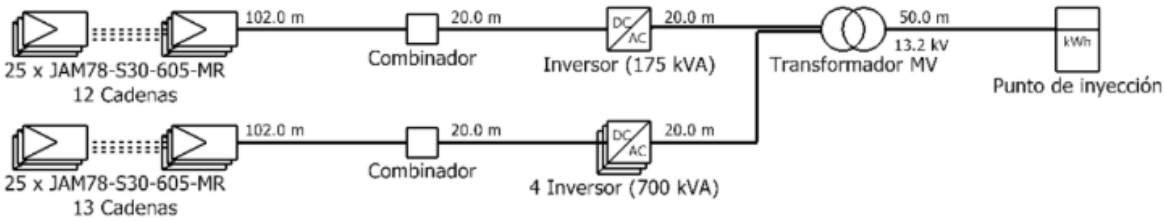


Figura 34: Arreglo Solar Basados en PVSyst: Adaptado de Software PVsyst

Como se identifica en la figura 34 el sistema corresponde a 5 Inversores 4 de ellos con 13 Strings (Cadenas) de 25 Modulos Cada una para un total de 1300 Modulos solares, y un ultimo inversor con una configuración de 12 Strings de 25 Modulos 300 Modulos adicionales, completando asi una cantidad de 1600 Modulos Solares Fotovoltaicos con una protencia DC de $1600x0,605kWp = 968kWp$.

Asi se veria la configuración correspondiente a uno de los arreglos, igual para 4 y variando la cuantia en el arreglo del inversor 5.

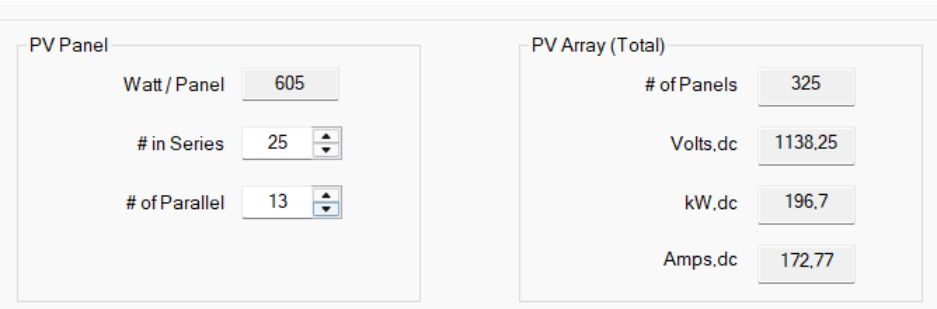


Figura 35: Configuración de Arreglo Solar: Adaptado de Software PVSyst

Continuando con la configuración de los componentes del sistema solar se procede a realizar

respectivamente la creación en el Software ETAP del modulo de inversor correspondiente al sistema solar Simulador (PVSyst) para ello también se debe contar con una referencia en este caso Inversor Huawei SUN 2000.185KTL-H1 (Huawei Technologies Co., Ltd., 2021), inversor con las siguientes características Eléctricas:

Efficiency	
Max. Efficiency	99.03%
European Efficiency	98.69%
Input	
Max. Input Voltage	1,500 V
Max. Current per MPPT	26 A
Max. Short Circuit Current per MPPT	40 A
Start Voltage	550 V
MPPT Operating Voltage Range	500 V ~ 1,500 V
Nominal Input Voltage	1,080 V
Number of Inputs	18
Number of MPP Trackers	9
Output	
Nominal AC Active Power	175,000 W @40°C
Max. AC Apparent Power	185,000 VA
Nominal Output Voltage	800 V, 3W + PE
Rated AC Grid Frequency	50 Hz / 60 Hz
Nominal Output Current	126.3 A @40°C
Max. Output Current	134.9 A
Adjustable Power Factor Range	0.8 LG ... 0.8 LD
Max. Total Harmonic Distortion	< 3%

Figura 36: Ficha Técnica Inversor : Adaptado de Catalogo Inversor Huawei

Y con una configuración respectivamente en el software ETAP de la siguiente manera:

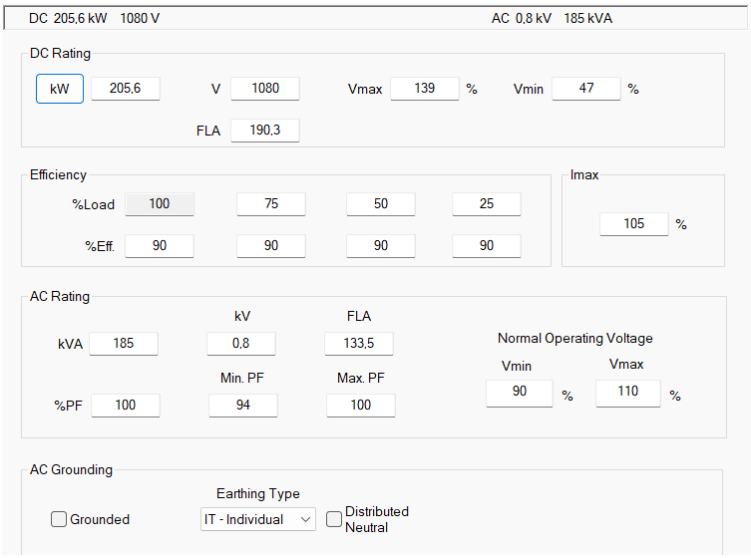


Figura 37: Configuración de Inversor en software: Elaboración Propia a partir de Software ETAP

7.1.2. Dimensionamiento técnico de Cable DC y Protecciones en DC

La selección de los conductores en corriente continua se realizó con base en la tensión máxima del arreglo, la corriente de diseño del string, la longitud de cada tramo y los criterios de coordinación de aislamiento exigidos por el sistema.Para ello se debe tener en cuenta información que nos permita identificar aquellos parámetros presenten en cada uno de los strings,Esta información se obtiene a partir de los circuitos eléctricos en Serie en este caso para cada string, la corriente es constante independiente de la cantidad de elementos que se conecten para entonces el criterio de selección del conductor por corriente corresponde a el valor de la corriente nominal del panel solar $13,29A$ y este valor dimensionado al 1.25 con el fin de dar un mayor margen de seguridad $13,29Ax1{,}25 = 16,61A$, la selección por nivel de tensión viene dada por la cantidad de modulos conectados en serie en la figura 35 se observa que el nivel de tensión del arreglo fotovoltaico es de $1138,25V\,DC$ y basados en la información de los MPPT del inversor podemos trabajar con valores hasta de $1500V\,DC$ por ende la selección de conductor para este tipo de montaje debe cumplir con almenos el nivel de tensión del MPPT a continuación se presenta una ficha tecnica de un cableado DC con su respectiva información de trabajo.

Características de instalación operación y desempeño
Performance, operation and installation parameters

Tensión Nominal 600 V AC / 1.8 kV DC
Rated Voltage

Temperatura máxima de operación 90° C
Maximum Operating Temperature

Temperatura mínima de operación -25° C
Minimum Operating Temperature

Normas UL 4703, NTC 6404
Standards *UL 4703, NTC 6404*

Certificaciones de producto RETIE y NTC
Products Certifications *RETIE and NTC*

Código *Code*	Calibre *Size* mm²	Diámetro exterior *External Diameter* mm	Clase de cableado *Stranding Type*	Masa total *Total Weight* kg/km	Radio mínimo de curvatura *Minimum bending radius* mm	Resistencia máxima del conductor *Max. Conductor Resistance* Ω/km	Capacidad de Corriente* *Ampacity* A
31399000601	4	5.6	Flexible	65	22	5.09	44
31399000701	6	6.8	Flexible	85	27	3.39	57
31399000801	10	7.9	Flexible	140	32	1.95	80

Figura 38: Información de cableado DC : Adaptado de catalogo PROCABLES

Como se observa la figura 38 el conductor seleccionado cumple con las caractericas de nivel de tensión operando este entre 600V a 1800VDC y el conductor apropiado basado en la información

de corriente, puede ser el de $4mm^2$, siendo este el elegido respectivamente para el sistema.

A continuación se presenta la configuración del conductor basados en la información dada por el fabricante todo aplicado al sistema que se ha venido trabajando en el Software ETAP, antes de proceder con la selección se debe hacer un equivalente de mm a AWG para este caso $4mm^2$ corresponde a un calibre $12AWG$ esto para facilidad de selección:

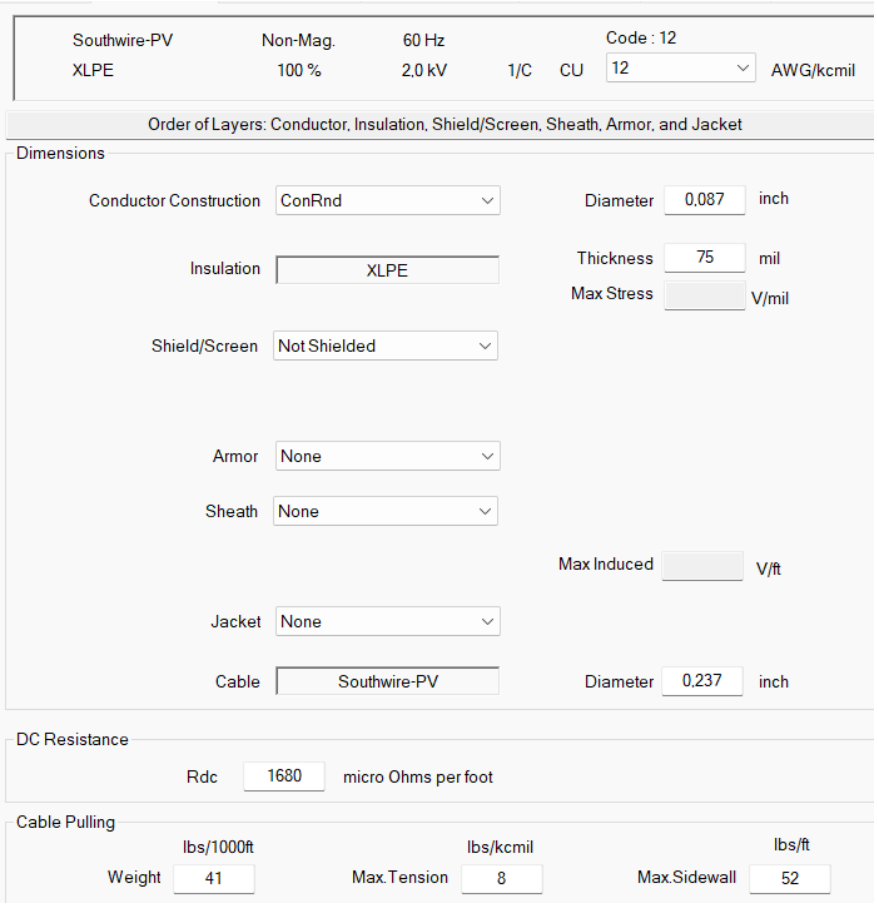


Figura 39: Cableado DC : Adaptado de Software ETAP

Como se observa en la figura 39, el cable entonces corresponde a XLPE con chaqueta en PVC, un nivel de tensión de hasta 2kV y la capacidad de corriente dada por el calibre propio y características del conductor.

Para la selección de protecciones en DC, la selección tambien debe estar basada en en la corriente de cada string, como anteriormente se mencionaba cada string cuenta con una corriente de $13,29Ax1{,}25 = 16,61A$ ya dimensionada, pero el inversor por cada MPPT recibe dos strings en paralelo es decir que la capacidad de corriente para la protección en DC debe ser de 4 polos, para

la selección de dicha protección tambien individualmente por cada string debemos contar con dos fusibles con capacidad de almenos $20A$ por string uno para cada Polo.

MAIN TECHNICAL PARAMETERS

Items	Technical parameters
Rated insulation voltage (Ui)	1250V
Rated operational voltage (Ue)	DC(1P):15V,24V,48V,60V,100V, 180V,250V; DC(2P):24V,48V,125V,375V,500V,550V,600V,800V DC(3P):750V,900V;DC(4P):1000V,1200V
Frame rated current	63A
Different current of the same frame (In)	6A、10A、16A、20A、25A、32A、40A、50A、63A
Number of poles	1P、2P、3P、4P
Rated service short-circuit breaking capacity (Ics)	6kA (2P 800V 4P1200V) 2kA
Rated ultimate short-circuit breaking capacity (Icu)	6kA (2P 800V 4P1200V) 2kA
Mechanical life	20000 times
Electrical life	10000 times (≤DC125V/1P, ≤ DC250V/2P),1500 times (other voltage specifications)
Certificate	CE, IEC, CB,TUV
Suitable for fishbone connector wiring and wire wiring	Suitable for fishbone connector wiring and wire wiring

Figura 40: Proteccion en DC: Adaptado de Catalago SunTree

Una vez identificado la protección en DC del catalogo Suntree (Suntree Electric Group Co., Ltd., 2026) 4 Polos capacidad de corriente 20 Amperios, 1200VDC. se hace respectivamente la selección de la protección DC en el software ETAP.

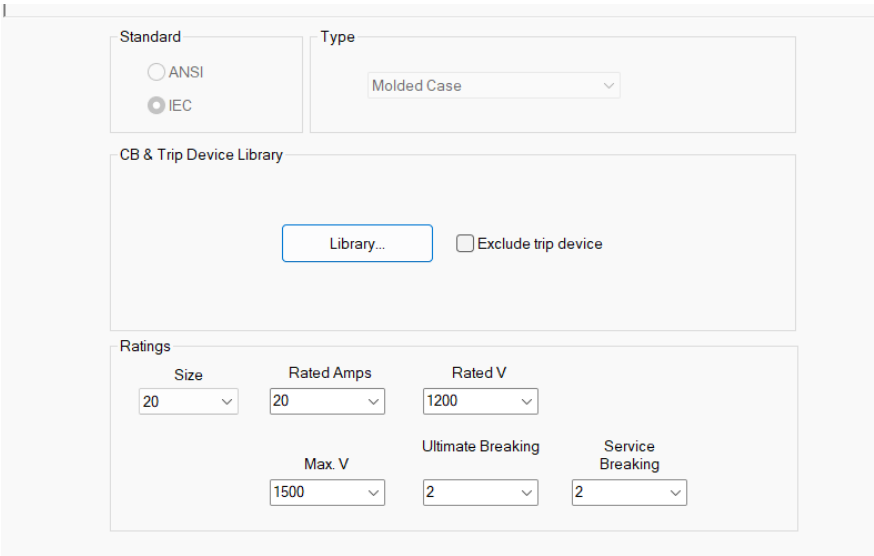


Figura 41: Caracteristicas Protección DC Software: Adaptado del Software ETAP

Por ultimo para la configuración del sistema DC es necesario como se menciono anteriormente

la selección de Fusibles en DC con la capacidad de soportar el nivel de tensión por string y la capacidad de corriente dimensionada al 1.25.

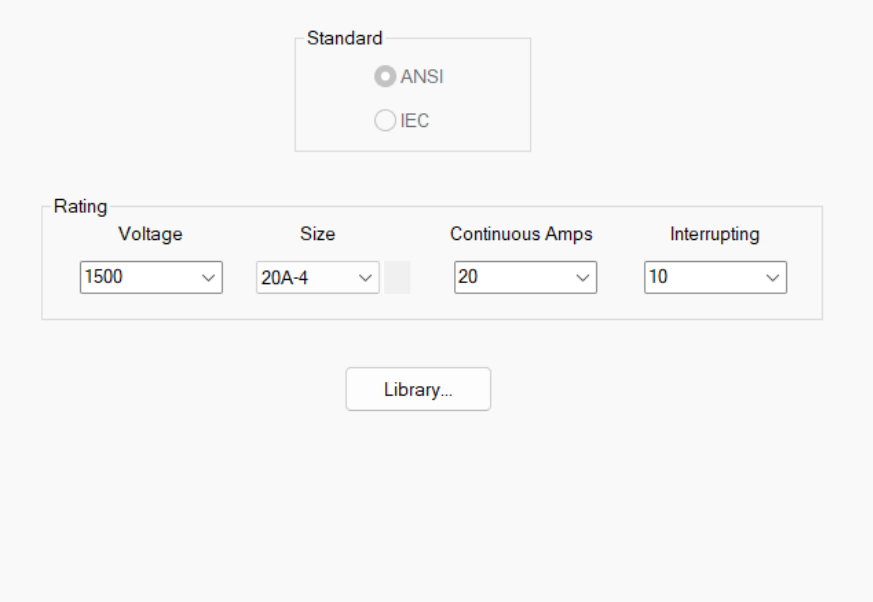


Figura 42: Configuración de Fusible DC: Adaptado del Software ETAP

7.1.3. Dimensionamiento técnico de Cable AC y Protecciones en AC

La selección de los conductores en corriente alterna se realizó con base en la capacidad nominal de corriente de los elementos presentes en el sistema, para ello debemos identificar aquellos tramos en donde existe un cableado en AC y posteriormente hacer el respectivo dimensionamiento, una vez definido la red de cableado DC desde los paneles solares hasta los inversores, entonces a partir del inversor hasta el tablero de protecciones en AC se tiene el primer tramo, para ello entonces dicha selección de cableado es basado en la capacidad nominal del inversor en la figura 37 se identifica que el inversor es de $185kVA - -0,8kV$ esto da entonces un indicador para el calculo respectivamente de la corriente:

$$I = \frac{185000VA}{\sqrt{3},800V} = 133{,}51A \tag{7.1}$$

Una vez obtenida la corriente maxima que puede existir entre el tramo del inversor al tablero de protecciones AC, posteriormente se hace un ajuste de $133,51Ax1{,}2 = 160A$ esto con el fin de

garantizar que la protección tenga un margen adicional de protección. se hace respectivamente la selección basados en la librería ETAP y las características conocidas como lo es Nivel de Tensión y Capacidad de corriente.

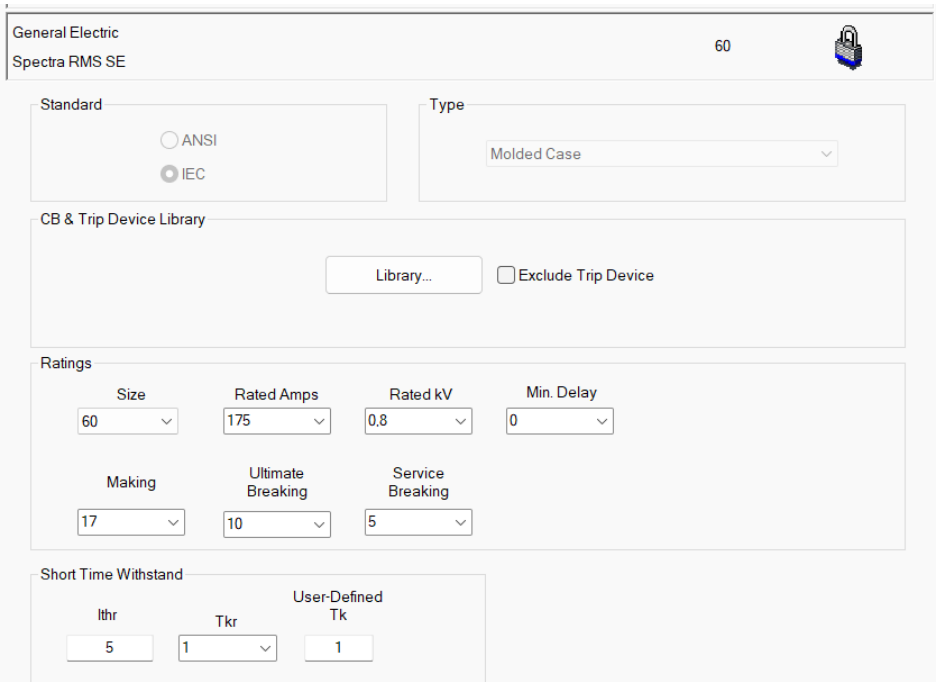


Figura 43: Caracteristicas de Protección en AC: Adaptado de software ETAP

La seleccion del conductor en AC cumple con la selección realizada a partir del cableado DC la unica diferencia que se puede encontrar es respectivamente la capacidad de corriente y el calibre del conductor, teniendo entonces la configuración establecida diseñada en el software PvSyst, como se observa en la Figura 34, se tiene un tramo desde el tablero de protecciones en AC hasta el transformador lado de baja tensión por tanto se debe tener en cuenta la capacidad total del transformador y la corriente que circula desde los inversores hasta dicho transformador. Incialmente la capacidad dada por los 5 inversores corresponde a 875kVA la corriente maxima presente a la salida de los inversores:

$$I = \frac{875000VA}{\sqrt{3}, 800V} = 631, 4A \tag{7.2}$$

Posteriormente se hace una comparación de la corriente maxima del arreglo fotovoltaico y el transformador seleccionado , para este caso la capacidad del transformador es de 1MVA corres-

ponde entonces su corriente nominal:

$$I = \frac{1000000VA}{\sqrt{3}, 800V} = 721{,}68A \tag{7.3}$$

La selección de la protección asociada al tramo del TPAC (Tablero de Protecciones en AC) y el Transformador esta dada por la maxima corriente entre la nominal del transformador y los inversores, por tanto el resultado es de $721{,}68A$ sin embargo se debe hacer respectivamente el ajuste porcentual definido de un 20 o 30 por ciento con el fin de garantizar un margen adicional de protección.

$$Iajustada = 721{,}68Ax1, 2 = 866{,}016A \tag{7.4}$$

Cabe resaltar que trabajar con una capacidad de corriente tan alta debe ser un problema en situaciones reales debido a que el calibre de los conductores sera muy alto por ende se puede hacer respectivamente un ajuste en la configuración de los conductores con el fin de que por cada fase existan 2 conductores y esto divide la corriente en dos tramos hacia el transformador, para ello entonces la capacidad de corriente del conductor debe ser del almenos $866{,}016A/2 = 433A$, en doble circuito a continuación la configuración en ETAP.

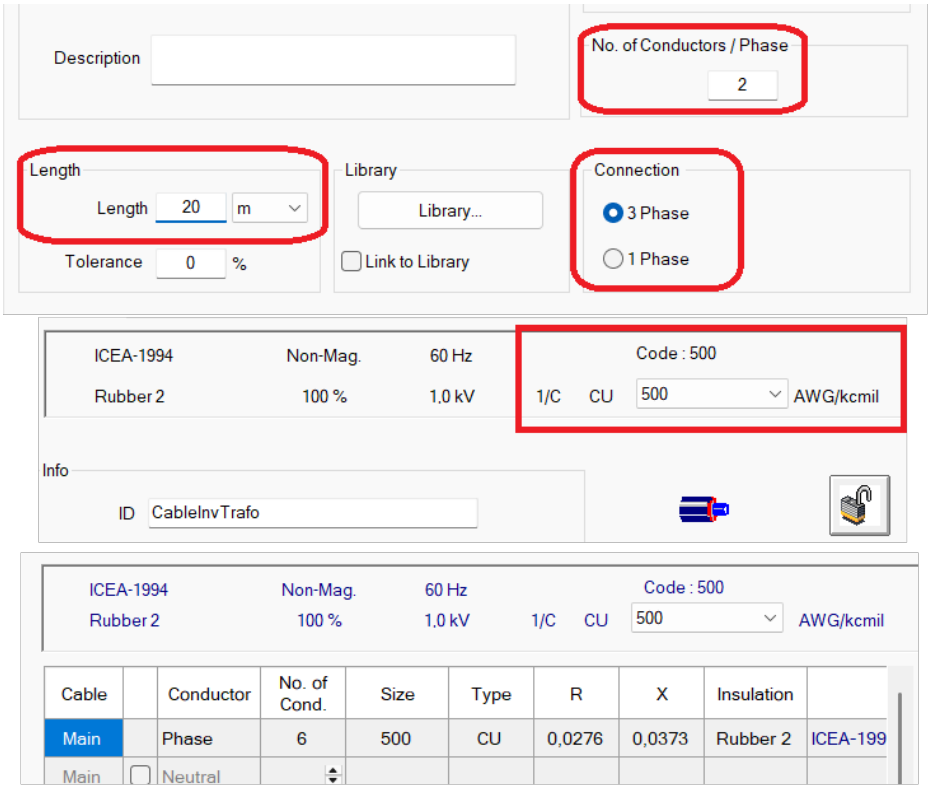


Figura 44: Configuración Conductor AC inversor a Transformador : Elaboración propia a partir de Software ETAP

Posteriormente se realiza la selección de la protección para cada tramo teniendo en cuenta que la corriente circulante nominal sera de $430A$.

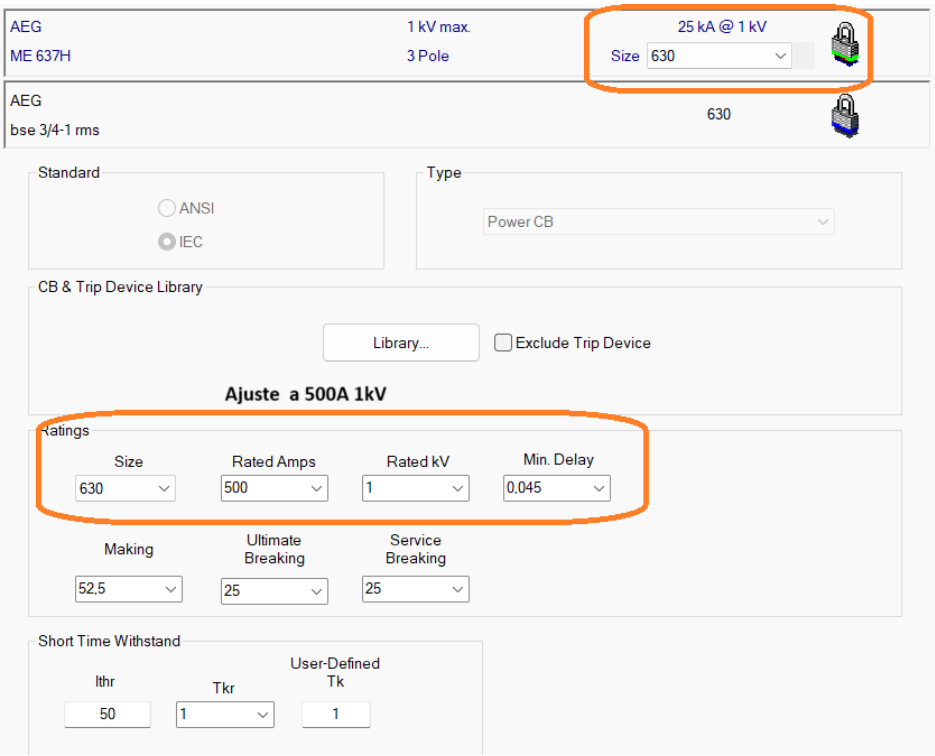


Figura 45: Ajuste de Protección en AC General: Adaptado de software ETAP

La selección de la protección en AC se dimensiona un poco debido a las capacidades de corriente que están presenten, en este caso el breaker AC seleccionado cuenta con capacidades de 400,500 y 630 A respectivamente la selección como se observa en la figura **??** es de $500A$ garantizando así la protección de conductores y sistema aguas abajo.

Protección y cableado de transformador

Dentro del apartado de protecciones AC se encuentra presente el elemento transformador, el cual constituye parte importante del diseño seleccionado y el desarrollo del proyecto solar fotovoltaico se debe tener en cuenta las protecciones con las que cuenta dicho elemento, para el caso presentado el transformador se realizo respectivamente la selección de un Fusible AC en el lado de alta tensión garantizando así una protección adicional para ello entonces se calcula la corriente que circula según la capacidad nominal de corriente por el lado de MT.

$$I = \frac{1000000VA}{\sqrt{3}x13{,}2kV} = 43,73A \tag{7.5}$$

Posteriormente se hace el respectivo ajuste del 20 porciento trabajado para la selección de protecciones y conductores $43,73Ax1{,}2 = 52,48A$ y se realiza la selección del fusible con las características.

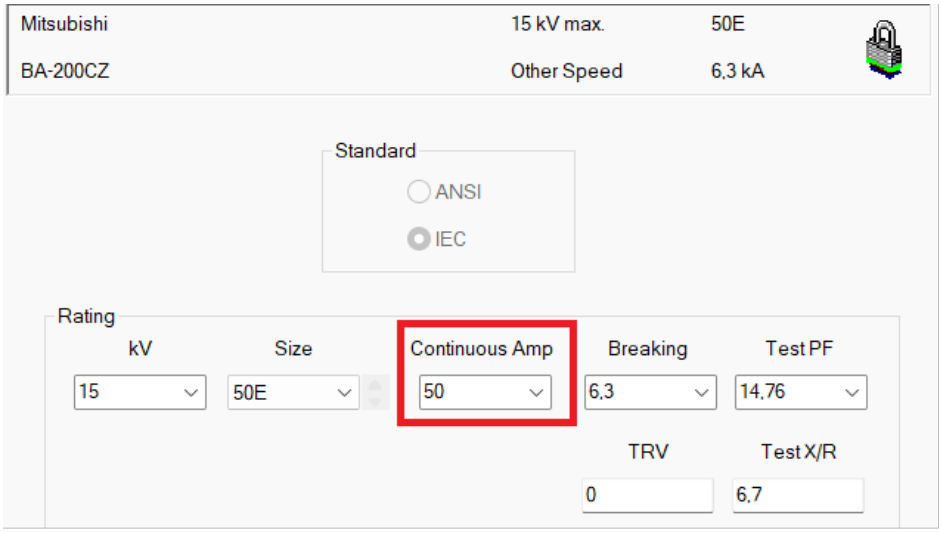


Figura 46: Selección de fusible AC de Transformador: Elaboración Propia a partir del software ETAP

Y no siendo menos importante la selección final que se realiza la selección del conductor de la RED de media tensión para ello, se debe entonces tener en cuenta nuevamente la capacidad de corriente y el nivel de tensión, generalmente la redes de media tensión cuentan con una serie conocida como 15kV por ende sera la base en tensión y los conductores generalmente son en Aluminio en Colombia por ende a partir de ello y sabiendo la capacidad de corriente que corresponde a los 52,48A que se obtuvieron anteriormente se selecciona el conductor:

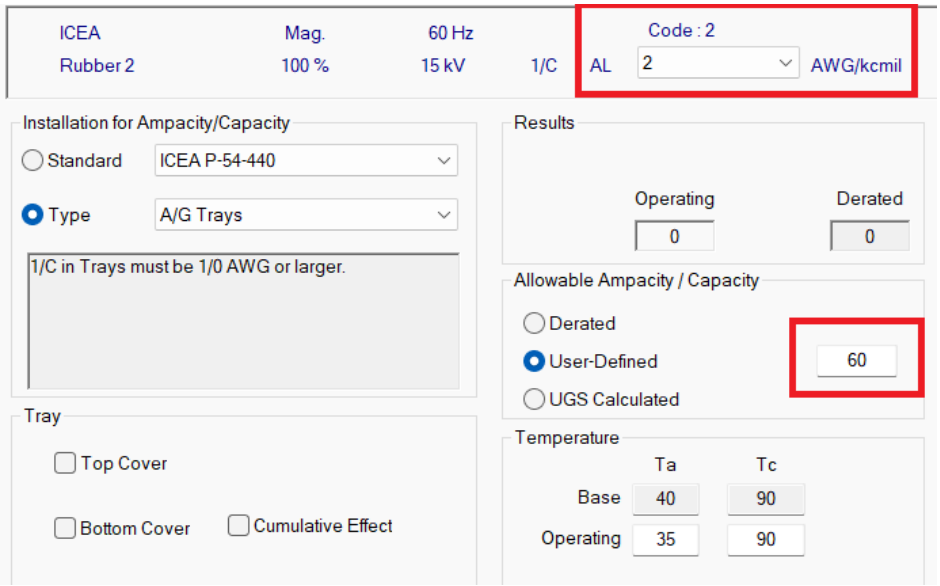


Figura 47: Selección de Cable en AC Media Tensión: Elaboración propia a partir del software ETAP

como se observa en la figura **??** se tiene un conductor de calibre 2AWG capacidad de corriente de 60Amp en aluminio serie 15kV.

7.2. Simulaciones en ETAP

En este apartado se desarrolla la simulación del sistema eléctrico mediante análisis de flujo de potencia en corriente continua (DC) y corriente alterna (AC), así como el estudio de fallas y la evaluación de la actuación de los dispositivos de protección. Posteriormente, se realiza el análisis de coordinación de protecciones mediante la obtención de las respectivas curvas tiempo-corriente, con el propósito de verificar la correcta selectividad y operación del sistema de protección.

Adicionalmente, se lleva a cabo el diseño de la malla de puesta a tierra para el sistema propuesto, la cual es dimensionada con base en la metodología establecida en la norma IEEE 80. Este análisis permite evaluar las tensiones de paso y de contacto, verificando que los valores obtenidos cumplan con los criterios de seguridad establecidos para garantizar la protección de las personas y de los equipos eléctricos.

Antes de comenzar con la simulación del sistema se puede observar a continuación el resultado final de la configuración del sistema:

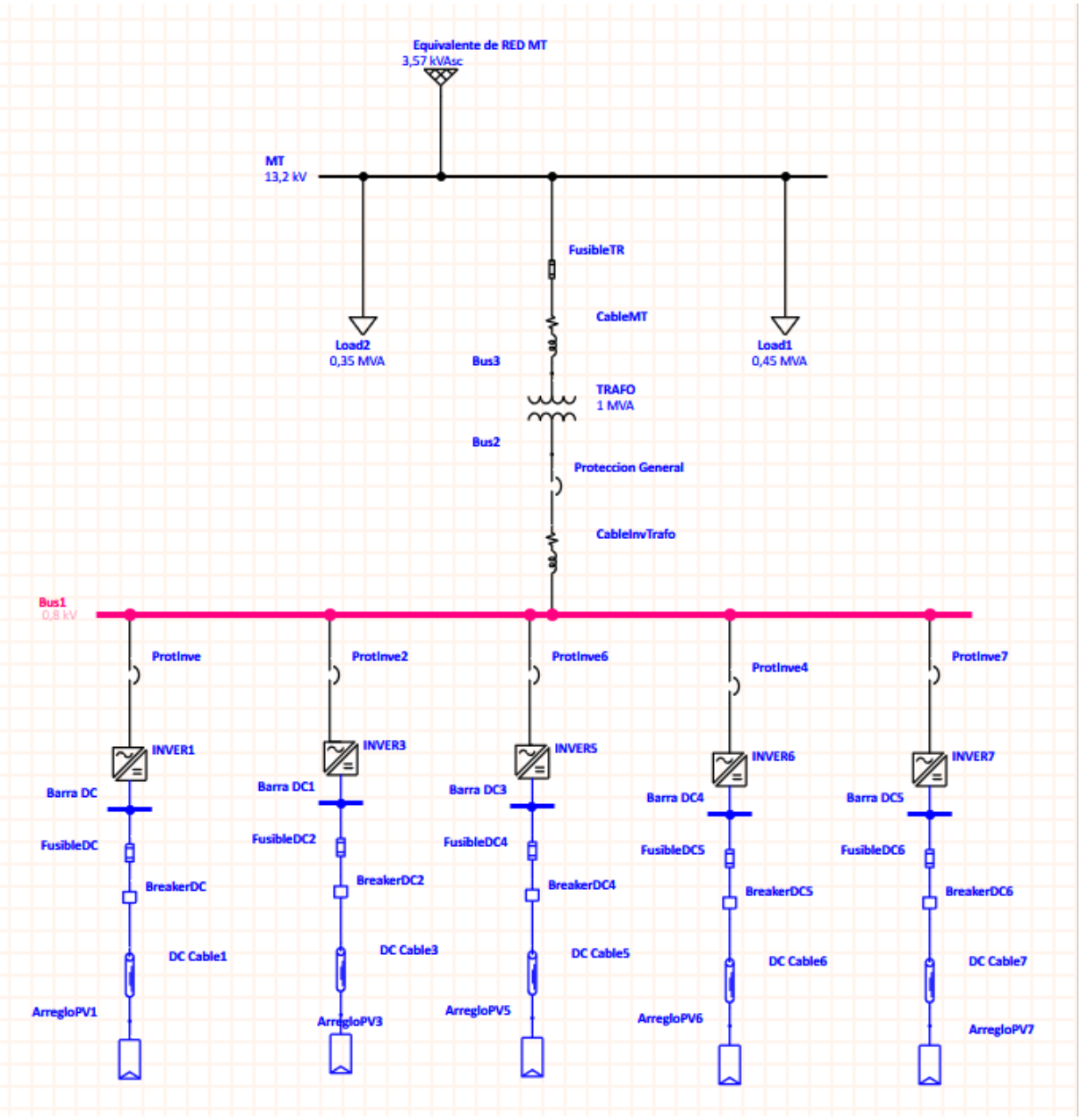


Figura 48: Cofiguración final de sistema Solar Fotovoltaico: Elaboración Propia a partir de Software ETAP

Flujo DC: A continuación se presentan los resultados de Flujo DC en el cual se observa corriente circulante, perdidas en Conductor DC, nivel de tensión en barras y caida de tensión en Cableado.

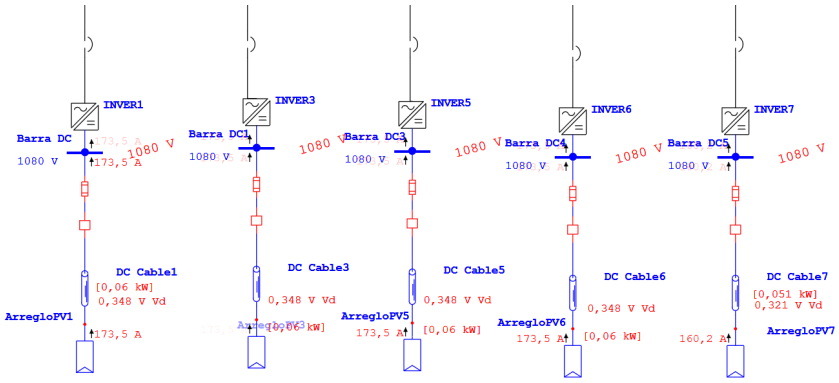


Figura 49: Resultado de Flujo DC: Elaboración propia a partir de software ETAP

Flujo AC: A continuación se presentan los resultados de Flujo AC en el cual se observa corriente circulante, perdidas en Conductor DC, nivel de tensión en barras y caida de tensión en Cableado.

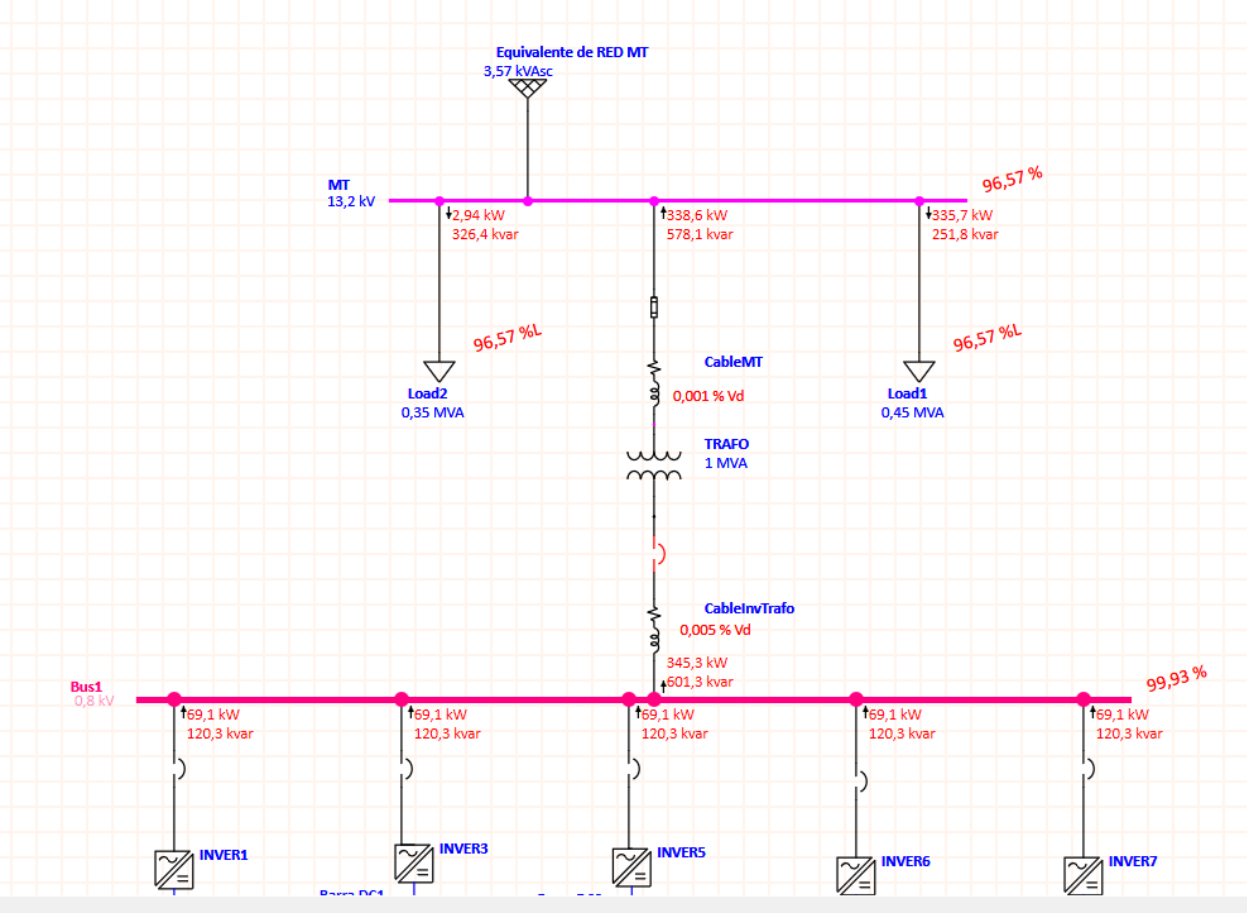


Figura 50: Resultado de Flujo AC: Elaboración propia a partir de software ETAP

Estudio de fallas: Se presenta el estudio de fallas del sistema simulado con el propósito de evaluar el comportamiento y la respuesta de los dispositivos de protección ante diferentes condiciones de falla. Inicialmente, se analiza una falla aplicada en el nodo de corriente continua (DC), con el fin de verificar la actuación de las protecciones instaladas en este tramo del sistema y comprobar que su respuesta sea consistente con la curva de coordinación de protecciones previamente establecida. Este análisis permite validar la correcta secuencia de operación de los dispositivos de protección, garantizando la selectividad y el despeje oportuno de la falla.

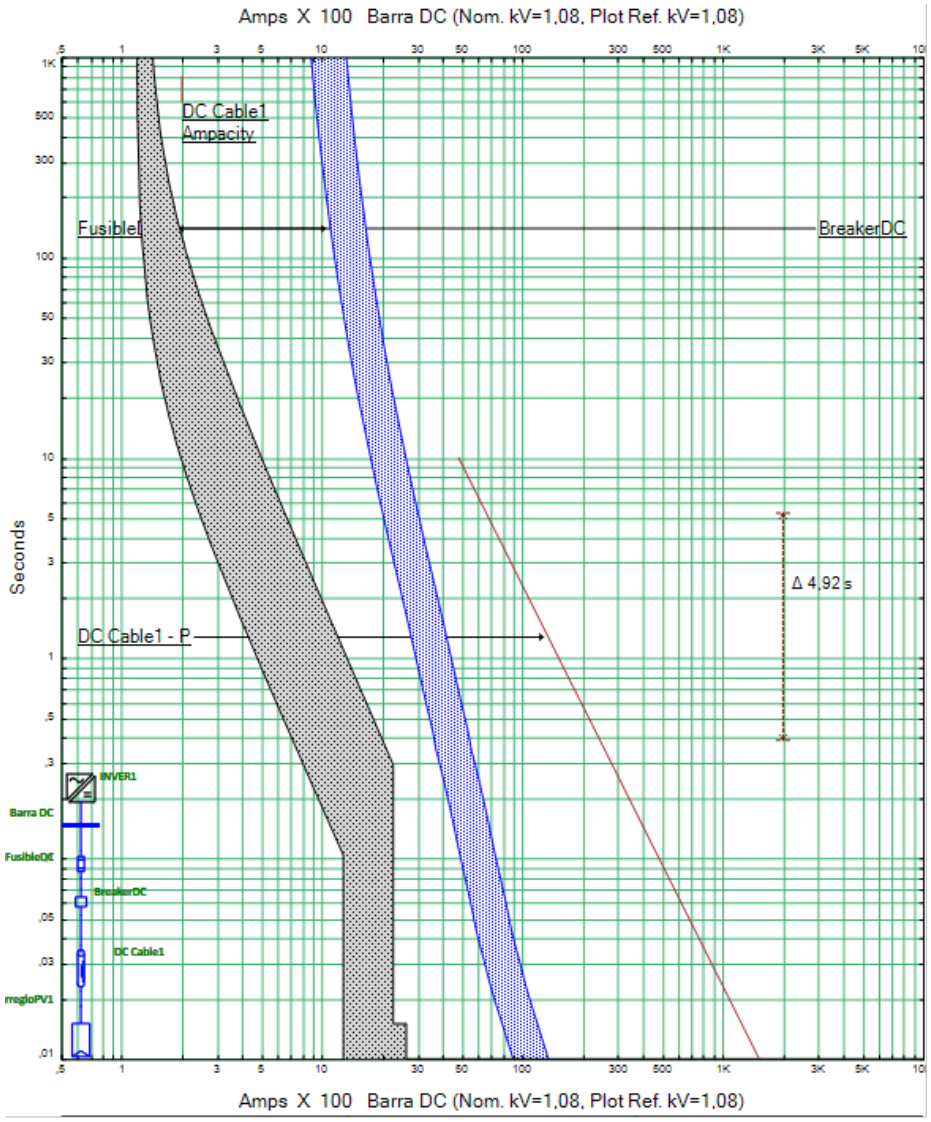


Figura 51: Curva de Coordinación de protecciones DC: Elaboración Propia a partir de Software ETAP

La curva de coordinación obtenida evidencia que el interruptor de corriente continua (DC Breaker) constituye el dispositivo de protección principal, siendo el primero en actuar ante condiciones de sobrecorriente. Como protección de respaldo se dispone un fusible ubicado aguas arriba, el cual opera únicamente en caso de que el interruptor principal no despeje la falla dentro del tiempo esperado.

Esta coordinación garantiza la selectividad del sistema de protección y asegura la adecuada protección del cableado. Asimismo, el conductor ha sido dimensionado con una capacidad de

conducción de corriente superior a la máxima corriente de operación y acorde con los criterios de protección establecidos, evitando que se presenten daños térmicos en el cable durante condiciones normales de funcionamiento o durante la actuación de los dispositivos de protección.

Posteriormente, se realiza el estudio de fallas en el sistema de corriente alterna (AC) con el objetivo de evaluar la respuesta de los dispositivos de protección ante diferentes condiciones de falla en esta etapa de la instalación. Para ello, se aplican las fallas correspondientes en el nodo de corriente alterna, verificando la actuación de los interruptores y demás elementos de protección de acuerdo con la coordinación previamente establecida. Este análisis permite comprobar la correcta operación, selectividad y tiempos de despeje de las protecciones, garantizando la seguridad del sistema y la adecuada protección de los equipos e infraestructura eléctrica.

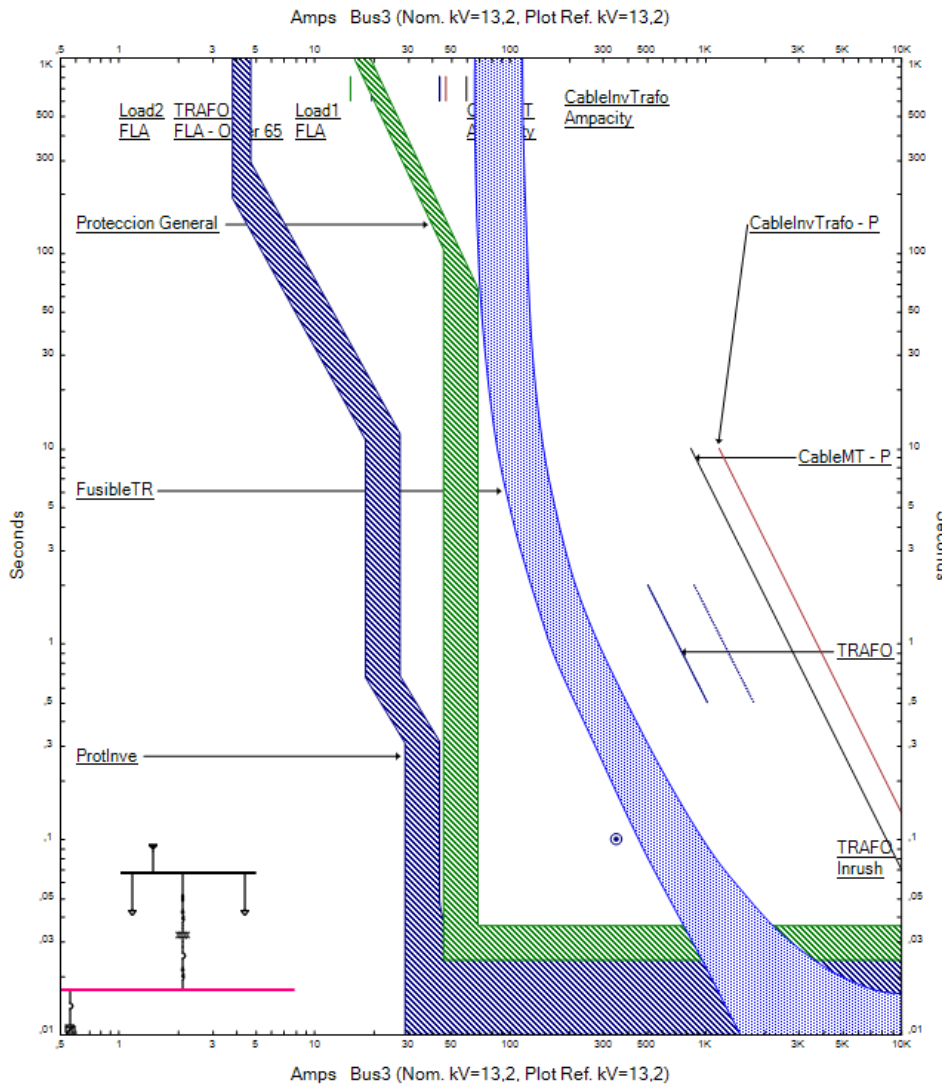


Figura 52: Curva de Coordinación de protecciones DC: Elaboración Propia a partir de Software ETAP

La figura anterior evidencia el correcto funcionamiento de la coordinación de protecciones del sistema. En condiciones de falla, la primera actuación corresponde a la protección individual de cada inversor, la cual está configurada para despejar la falla de manera selectiva y aislar únicamente el equipo afectado. En caso de que esta protección no opere dentro del tiempo establecido, entra en funcionamiento la protección general del sistema, encargada de desconectar el circuito como mecanismo de respaldo. Finalmente, si la falla persiste o las protecciones anteriores no actúan adecuadamente, el fusible ubicado aguas arriba del transformador opera como protección de último respaldo.

Esta secuencia de actuación garantiza una adecuada coordinación y selectividad entre los dispositivos de protección, asegurando el despeje oportuno de las fallas, minimizando la afectación sobre el resto del sistema y proporcionando una protección efectiva para los equipos e instalaciones eléctricas.

Malla de Puesta a tierra: La configuración de la malla de puesta a tierra diseñada para el sistema propuesto corresponde a una malla cuadrada de 5 m × 5 m, conformada por conductores dispuestos con una separación de 1 m entre ellos. La malla fue diseñada para instalar a una profundidad de enterramiento de 0,5 m y emplea un conductor de cobre calibre 2/0 AWG. Adicionalmente, el sistema incorpora cuatro electrodos verticales de puesta a tierra, ubicados estratégicamente en cada una de las esquinas de la malla, con el propósito de mejorar la disipación de corriente hacia el terreno y reducir la resistencia global del sistema de puesta a tierra.

Para la caracterización del terreno se consideró un modelo de dos capas, definido a partir de las mediciones de resistividad eléctrica realizadas en campo sobre el área destinada para el proyecto. La capa superficial está conformada por un material de tipo granito, con un espesor de 0,15 m y una resistividad de 1318 ·m, mientras que la capa inferior corresponde a un suelo húmedo, cuya resistividad es de 1,8 ·m. Estas características representan las condiciones reales del sitio de instalación y constituyen un parámetro fundamental para el dimensionamiento de la malla de puesta a tierra.

Con base en esta información, el diseño fue desarrollado siguiendo la metodología establecida en la IEEE Std 80 (*IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*, 2015), la cual establece los criterios para el dimensionamiento de sistemas de puesta a tierra mediante la evaluación de parámetros como la resistencia de la malla, la distribución del potencial eléctrico y las tensiones de paso y de contacto. De esta manera, la configuración propuesta permite garantizar que las tensiones presentes durante condiciones de falla permanezcan dentro de los límites de seguridad establecidos por la norma, contribuyendo a la protección tanto del personal como de los equipos eléctricos instalados.

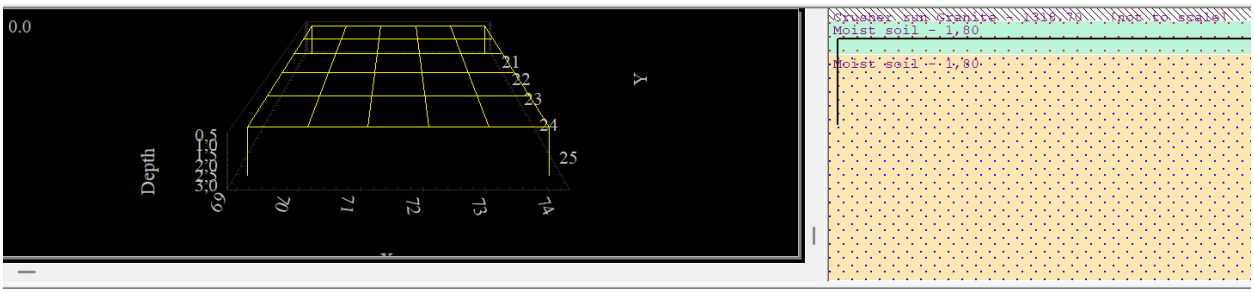


Figura 53: Configuración de malla de Puesta a Tierra: Elaboración propia a partir de software ETAP

Por ultimo se muestran los resultados obtenidos en el software que validan entonces que la malla cumple con las tensiones de paso y de contacto admisibles y la resistencia de puesta a tierra para subestaciones de este estilo.

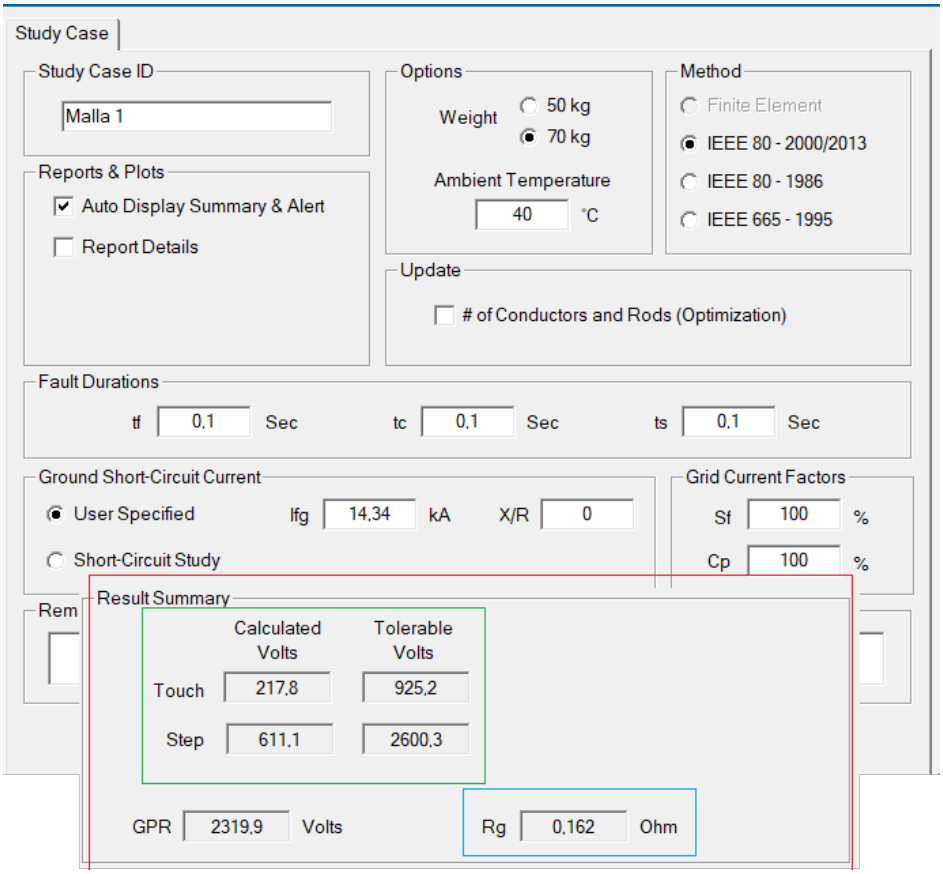


Figura 54: Resultados de malla de puesta a tierra: Elaboración Propia a partir del software ETAP

La figura anterior presenta el resumen de resultados obtenido para el diseño de la malla de puesta a tierra en ETAP, utilizando la metodología establecida en la IEEE Std 80-2000/2013. A partir de las características geométricas de la malla, las propiedades eléctricas del terreno y la corriente de falla considerada, el software determinó una resistencia de puesta a tierra de 0,162 y una elevación del potencial de tierra (GPR) de 2319,9 V. Asimismo, se verificó que las tensiones de contacto (217,8 V) y de paso (611,1 V) se encuentran por debajo de los límites tolerables establecidos por la norma (925,2 V y 2600,3 V, respectivamente), lo que demuestra que el diseño propuesto cumple con los criterios de seguridad eléctrica y proporciona una adecuada protección para las personas y los equipos ante condiciones de falla.

Capítulo 8

Resultados e Impacto

El software ETAP constituye una de las herramientas más completas para el análisis, diseño y validación de sistemas eléctricos de potencia, debido a que integra en una única plataforma diferentes módulos de simulación que permiten evaluar el comportamiento de una instalación bajo múltiples condiciones de operación. Su aplicación no se limita a sistemas fotovoltaicos, sino que también abarca redes de distribución, plantas industriales, sistemas de generación convencional y renovable, microrredes y sistemas eléctricos de gran escala.

En el caso específico de los sistemas fotovoltaicos, ETAP permite desarrollar un modelo detallado de cada uno de los componentes que conforman la instalación, incluyendo módulos fotovoltaicos, inversores, transformadores, conductores, barras, cargas y dispositivos de protección. A partir de este modelo es posible realizar estudios de flujo de potencia en corriente continua (DC) y corriente alterna (AC), análisis de cortocircuito, coordinación de protecciones, dimensionamiento de equipos, calidad de energía, estabilidad del sistema y diseño de mallas de puesta a tierra, entre otros. La integración de estos análisis en un mismo entorno reduce la necesidad de utilizar múltiples herramientas de software y garantiza la consistencia de los resultados obtenidos.

Una de las principales ventajas de ETAP es que sus modelos matemáticos se encuentran basados en estándares internacionales y metodologías ampliamente aceptadas por la industria eléctrica, tales como IEEE, IEC, ANSI y NFPA. Esto permite obtener resultados confiables y reproducibles, facilitando la validación técnica de los diseños y el cumplimiento de los requisitos normativos exigidos en proyectos de ingeniería.

Adicionalmente, el software incorpora bibliotecas de fabricantes con características reales de equipos eléctricos, lo que permite representar con mayor precisión el comportamiento de los com-

ponentes instalados en campo. Esta característica mejora la exactitud de las simulaciones y reduce las incertidumbres durante las etapas de diseño y evaluación de proyectos.

Desde el punto de vista operativo, la utilización de ETAP favorece la optimización del diseño de los sistemas eléctricos al permitir identificar sobrecargas, caídas de tensión, niveles de cortocircuito, condiciones de operación anormales y posibles deficiencias en la coordinación de protecciones antes de la construcción o puesta en servicio de una instalación. De esta manera, se disminuyen los riesgos asociados a fallas, se optimiza la selección de equipos y se reducen costos derivados de modificaciones posteriores en el proyecto.

En aplicaciones fotovoltaicas, estas capacidades adquieren una importancia aún mayor debido a la naturaleza variable de la generación solar y a la interacción permanente entre el sistema de corriente continua, los inversores y la red eléctrica en corriente alterna. La posibilidad de analizar integralmente todas estas etapas dentro de un mismo modelo permite obtener diseños más seguros, confiables y eficientes, convirtiendo a ETAP en una herramienta de alto valor para empresas dedicadas a la consultoría, diseño y evaluación de sistemas eléctricos y de generación con fuentes de energía renovable.

8.1. Mejoras técnicas obtenidas

La implementación de la metodología de modelado y simulación desarrollada en ETAP permitió fortalecer el proceso de análisis y diseño de sistemas fotovoltaicos dentro de la empresa, al disponer de una herramienta capaz de integrar en un único entorno los principales estudios eléctricos requeridos durante las etapas de ingeniería. Esto redujo la necesidad de emplear múltiples aplicaciones de software y facilitó la validación técnica de los proyectos mediante resultados consistentes y reproducibles.

Entre las principales mejoras obtenidas se encuentra la estandarización del procedimiento para el modelado de sistemas fotovoltaicos, permitiendo representar de manera detallada los módulos fotovoltaicos, inversores, transformadores, conductores, cargas y dispositivos de protección. Esta estandarización facilita la actualización de proyectos futuros y disminuye los tiempos requeridos para el desarrollo de nuevas simulaciones.

Asimismo, la metodología permitió incorporar estudios de flujo de potencia en corriente conti-

nua (DC) y corriente alterna (AC), análisis de cortocircuito, coordinación de protecciones y diseño de sistemas de puesta a tierra bajo los lineamientos de la norma IEEE Std 80. La integración de estos estudios proporciona una evaluación completa del comportamiento del sistema, permitiendo identificar posibles condiciones de sobrecarga, caídas de tensión, niveles de corriente de falla y riesgos asociados a la seguridad eléctrica antes de la implementación física del proyecto.

Otra mejora significativa corresponde al proceso de selección y ajuste de los dispositivos de protección. Mediante el análisis de las curvas de coordinación fue posible verificar la correcta selectividad entre los diferentes niveles de protección, garantizando tiempos adecuados de despeje de fallas y reduciendo la posibilidad de desconexiones innecesarias del sistema.

Finalmente, la implementación de esta metodología incrementa la confiabilidad de los estudios desarrollados por la empresa, proporcionando un procedimiento técnico sustentado en normas internacionales y facilitando la elaboración de memorias de cálculo y documentación técnica para proyectos de generación fotovoltaica y otros sistemas eléctricos de potencia.

Capítulo 9

Conclusiones

1. Se desarrolló e implementó una guía metodológica estandarizada para la evaluación de sistemas solares fotovoltaicos mediante el software ETAP, cumpliendo con el objetivo general planteado. La metodología integra en un único procedimiento las etapas de modelado, simulación y análisis eléctrico, proporcionando una herramienta que mejora la precisión, la confiabilidad y la reproducibilidad de los estudios de prefactibilidad realizados por la Corporación EMA.

2. El diagnóstico realizado sobre el proceso de prefactibilidad permitió identificar oportunidades de mejora relacionadas con la ausencia de procedimientos estandarizados para el uso de ETAP. La documentación del proceso existente sirvió como base para definir una metodología uniforme que facilita el desarrollo de futuros estudios y disminuye la dependencia de criterios individuales durante el proceso de modelado.

3. La guía metodológica diseñada permitió estructurar de manera secuencial el modelado de sistemas fotovoltaicos conectados a la red, incluyendo la parametrización de módulos fotovoltaicos, inversores, transformadores, conductores, protecciones, cargas y red equivalente. Asimismo, incorpora la ejecución de estudios de flujo de potencia en corriente continua (DC) y corriente alterna (AC), análisis de cortocircuito, coordinación de protecciones y diseño de mallas de puesta a tierra bajo los lineamientos de la norma IEEE Std 80.

4. La elaboración del archivo plantilla (.otp) en ETAP constituye un aporte técnico para la empresa, ya que permite reutilizar configuraciones previamente parametrizadas y reducir significativamente el tiempo requerido para el desarrollo de nuevos proyectos. Esta plantilla

facilita la estandarización de criterios de modelado y mejora la consistencia de los resultados obtenidos entre diferentes estudios.

5. La validación de la metodología mediante un caso de estudio real demostró que el procedimiento desarrollado permite representar adecuadamente el comportamiento eléctrico del sistema fotovoltaico bajo condiciones normales de operación y durante escenarios de falla. Los resultados obtenidos en los estudios de flujo de potencia, cortocircuito, coordinación de protecciones y puesta a tierra evidenciaron el correcto desempeño del sistema y la adecuada selección de los dispositivos de protección, garantizando el cumplimiento de criterios técnicos y de seguridad.

6. La implementación de la metodología permitió optimizar el proceso de desarrollo de estudios de prefactibilidad, reduciendo tiempos de modelado y análisis, mejorando la organización de la información técnica y facilitando la generación de documentación para proyectos de consultoría energética. Esto representa un valor agregado para la Corporación EMA al fortalecer sus capacidades técnicas en el diseño y evaluación de sistemas fotovoltaicos.

7. Finalmente, el trabajo desarrollado evidencia que ETAP constituye una herramienta robusta para la ingeniería de sistemas fotovoltaicos, debido a la integración de múltiples módulos de análisis dentro de una misma plataforma y al empleo de metodologías respaldadas por normas internacionales. La metodología implementada podrá servir como base para futuros proyectos de generación distribuida, microrredes y otros sistemas eléctricos que requieran estudios técnicos de alta confiabilidad.

Referencias

Congreso de Colombia. (1994, 11 de julio). *Ley 142 de 1994. por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones.* Descargado 2026-06-26, de https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=2752 (Diario Oficial No. 41.433 del 11 de julio de 1994)

ENERGIAS, M. D. H. Y. (2022, 10). Guía para realizar una auditoría energética. , 6. Descargado de https://energypedia.info/images/1/1e/GU%C3%8DA_PARA_REALIZAR_UNA_AUDITOR%C3%8DA_ENERG%C3%89TICA.pdf

ETAP. (2021). *Etap user guide.*

Huawei Technologies Co., Ltd. (2021). *Sun2000-30ktl-m3 / sun2000-36ktl-m3 / sun2000-40ktl-m3: Technical datasheet.* Descargado de https://solar.huawei.com/en-GB/download?p=%2F-%2Fmedia%2FSolar%2Fattachment%2Fpdf%2Fes%2Fdatasheet%2FSUN2000-30-40KTL-M3.pdf (Consultado el 17 de Junio de 2026)

Ieee guide for safety in ac substation grounding (n.º IEEE Std 80-2013). (2015). Piscataway, NJ, USA: IEEE. doi: 10.1109/IEEESTD.2015.7109078

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (2020). *Ntc 2050: Código eléctrico colombiano*. Bogotá, Colombia: ICONTEC.

JA Solar. (2026). *Jam78s30-mr (580–605 w): Ficha técnica del módulo fotovoltaico.* Descargado de https://www.jasolar.eu/es/productos/jam78s30-mr (Consultado el 07 de julio de 2026)

LONGi Solar. (2025). *Lr7-60hvd-530-555m datasheet.* Descargado de https://eu.longi.com/es/longi-solar-panels-datasheets/lr7-60hvd-530-555m (Consultado el 1 de julio de 2026)

Ministerio de Minas y Energía. (2024). *Resolución 40117 de 2024. reglamento técnico de instalaciones eléctricas (retie).* Bogotá, Colombia.

PVsyst SA. (2026). *Pvsyst: Software de simulación de sistemas fotovoltaicos.* Descargado de `https://www.pvsyst.com/es/` (Consultado el 07 de julio de 2026)

Suntree Electric Group Co., Ltd. (2026). Dc circuit breaker sl7n-63: Technical datasheet [Manual de software informático]. Descargado de `https://cdn.autosolar.co/pdf/ficha-tecnica-breaker-dc-suntree.pdf` (Ficha técnica. Consultado el 10 de julio de 2026)

Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2026). *Geovisor de potenciales de fuentes no convencionales de energía renovable (fncer) - energía solar.* Descargado de `https://sig.upme.gov.co/portal/apps/experiencebuilder/experience/?id=82a2ffd8039b49c6a987248bc022ea02&page=Solar` (Consultado el 03 de julio de 2026)