



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE GUAYAQUIL

CARRERA ELECTRICIDAD

**ESTUDIAR LA ALIMENTACIÓN DE UN TRANSFORMADOR
MONOFÁSICO DE 15KVA / 2400V / 220V MEDIANTE UN SISTEMA
FOTOVOLTAICO**

Trabajo de titulación previo a la obtención del

Título de Ingeniero Eléctrico

AUTOR: Marcel Mauricio Zuñiga Plaza

TUTOR: Ing. Otto Washington Astudillo Astudillo

Guayaquil – Ecuador

2025

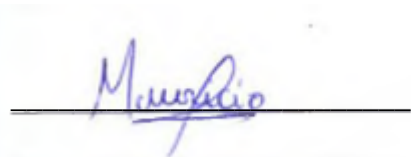
CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Marcel Mauricio Zuñiga Plaza con documento de identificación N° 0952854099; manifestamos que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Guayaquil, 1 de agosto del año 2025

Atentamente,



Marcel Mauricio Zuñiga Plaza

0952854099


**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Marcel Mauricio Zuñiga Plaza con documento de identificación No. 0952854099, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Proyecto Técnico: “Estudiar la alimentación de un transformador monofásico de 15KVA / 220V/ 2400V mediante un sistema fotovoltaico”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 1 de agosto del año 2025.

Atentamente,



Marcel Mauricio Zuñiga Plaza

0952854099

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Otto Washington Astudillo Astudillo con documento de identificación N° 0102054871 docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: “ESTUDIAR LA ALIMENTACIÓN DE UN TRANSFORMADOR MONOFÁSICO DE 15KVA/ 220V/ 2400V MEDIANTE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO”, realizado por Marcel Mauricio Zuñiga Plaza con número de identificación N° 0952854099, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 1 de agosto del año 2025

Atentamente,



Ing. Otto Washington Astudillo Astudillo

0102054871

DEDICATORIA

A Dios, mi fuerza y refugio constante. Gracias por acompañarme en cada etapa de este proceso. En los momentos difíciles me diste aliento, cuando dudé me ofreciste claridad, y siempre me mostraste el camino. Este logro no habría sido posible sin Tu guía. Todo mi agradecimiento y reconocimiento son para Ti.

A mis padres, este triunfo también les pertenece. Cada esfuerzo, cada día de trabajo y cada decisión tomada pensando en mí han sido fundamentales para llegar hasta aquí. Gracias por su amor, por creer en mí y por enseñarme con su ejemplo el valor del compromiso, del esfuerzo y del aprendizaje. Es un honor dedicarles esta tesis. Los amo profundamente.

A mi abuelita, gracias por tu amor sin condiciones, por tus sabios consejos y por tu fe constante. Tu ternura, tus palabras y tus oraciones me han dado fuerza muchas veces. Tenerte a mi lado ha sido una bendición que valoro inmensamente.

A mi compañero de cuatro patas, gracias por estar ahí en cada jornada larga, por tus silencios reconfortantes, tus siestas a mi lado mientras escribían y por ser esa presencia tranquila que tanto alivio me dio. En los días de estrés, tus maullidos, tus miradas y tu compañía fueron más valiosos de lo que podrías imaginar. Esta tesis también es tuya, porque me acompañaste en cada paso del camino.

Marcel Mauricio Zuñiga Plaza

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi tutor de tesis, al Ing. Otto Astudillo Astudillo. Su conocimiento, su guía y sus consejos siempre acertados fueron fundamentales para llevar adelante este trabajo. Agradezco profundamente su confianza en mí y el apoyo constante que me brindó en los momentos clave. Su mentoría no solo fue clave en este proyecto, sino que también ha dejado una huella muy valiosa en mi formación académica y personal.

Marcel Mauricio Zuñiga Plaza

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	ii
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA	iii
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE DE CONTENIDO	vii
ÍNDICE DE IMÁGENES.....	xii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xv
RESUMEN	xvi
ABSTRACT	xvii
1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1. Título.....	1
1.3. Problema de estudio	1
1.5.1 Objetivo General:	3
1.6. Marco hipotético	3
2.1. La energía solar.....	5
2.2. Radiación solar.....	5
2.3. Radiación Directa.....	6
2.4. Radiación Difusa.....	6
2.5. Irradiancia solar	6
2.6. Efecto fotovoltaico.....	7
2.7. Funcionamiento de células fotovoltaicas	8
2.8. Clasificación de células fotovoltaicas.....	8

2.9.	Células monocristalinas	8
2.10.	Células multicristalinas o policristalinas.....	8
2.11.	Células híbridas	9
2.12.	Células amorfas	9
2.15.	Paneles solares.....	11
2.16.	Tipos de paneles solares	12
2.16.1.	Paneles Monocristalinos	12
2.16.2.	Paneles Policristalinos	12
2.16.3.	Paneles de amorfo.....	13
2.17.	Batería solar.....	13
2.18.	Transformador.....	16
2.20.	Controlador de carga	18
2.21.	Inversores	19
2.22.	Estructura de montaje.....	19
2.23.	Rele estado solido.....	20
2.27.	PVSYST	23
2.28.	ATP DRAW	24
3.	CAPITULO III: Modelado del transformador monofásico	26
3.1.	Especificaciones del Transformador.....	26
3.1.1.	Parámetros Eléctricos Clave	26
3.2.	Cálculo de la Corriente Nominal	27
3.3.	Cálculo de la Corriente a Vacío	27
3.4.	Corriente Pico	28
3.5.	Cálculo del Flujo Magnético a Vacío	28
3.6.	Impedancia Base	29
3.7.	Cálculo de la Impedancia Propia del Transformador	29

3.8.	Resistencia de Cortocircuito (R_{cc})	30
3.9.	Reactancia de Cortocircuito (X_{cc}).....	30
3.10.	Inductancia de Dispersión (L_{cc})	31
3.11.	Cálculo de la Resistencia de Magnetización	32
3.12.	Modelo en ATP-DRAW del transformador	32
3.12.1.	Parámetros considerados para la simulación	33
3.13.	Estructura del modelo en ATP-Draw	33
3.14.	Curvas de Saturación.....	38
4.	Capítulo IV: Modelado del panel solar	39
4.1.	Panel fotovoltaico para la alimentación de un transformador monofásico.....	39
4.2.	Ecuación del modelo del panel	39
4.3.	Ecuación basada en los datos del catálogo del panel solar	41
4.4.	Ecuación del panel tensión máxima potencia 42.8V	42
4.5.	Ecuación del panel tensión de circuito abierto 51.7V.....	43
4.5.1.	Corriente a voltaje de circuito Abierto (42.8 V).....	44
4.5.2.	Corriente a voltaje de circuito abierto (51.7 V).....	44
4.6.	Calculo simultáneo de M mediante de ecuaciones del modelo fotovoltaico ...	45
4.6.1.	Evaluación a 42.8 V.....	45
4.6.2.	Evaluación a 51.7 V.....	45
4.7.	Curva I-V modelado en ATP- DRAW.....	46
4.8.	Configuración en ATP-DRAW.....	48
4.9.	Curva I-V en 1000W/m ² en ATP.....	50
4.10.	Curva I-V de 800W/m ² en ATP-DRAW.....	51
4.11.	Curva I-V de 600W/m ² en ATP	52
4.12.	Curva I-V de 400W/m ² en ATP	54
4.13.	Curva I-V de 200W/m ² en ATP	55
5.	CAPITULO V: SISTEMA FOTOVOLTAICO	56

5.1.	Diagrama de bloque	56
5.2.	Información Geográfica en PVSYST de la irradiancia fotovoltaica	57
5.2.1.	Producción estimada mensualmente para el sistema fotovoltaico.....	58
5.2.2.	Gráfico de columnas de la irradiación global	59
5.2.3.	Gráfico de columnas de la irradiación difusa	59
5.2.4.	Inclinación óptima de los paneles fotovoltaicos.....	60
5.2.5.	Optimización de la inclinación y orientación del plano	61
5.2.6.	Gráfico de columnas de la temperatura	61
5.3.	Configuración de los módulos fotovoltaicos	62
5.4.	REGULADOR DE CARGA.....	64
5.4.1.	Compatibilidad con el banco de baterías.....	64
5.4.2.	Características del regulador seleccionado.....	64
5.4.3.	Justificación de la elección	65
5.4.4.	FUNCIONES PRINCIPALES DEL REGULADOR:.....	65
5.5.	Baterías	66
5.5.1.	Cálculo de la capacidad operativa del banco de baterías.....	66
5.5.2.	Redimiendo con el sistema de baterías.....	67
5.6.	Inversor	68
5.6.1.	Análisis técnico del inversor seleccionado.....	69
5.6.2.	Cálculo de corriente nominal en AC	69
5.6.3.	Rendimiento del inversor con el banco de baterías	70
5.7.	Aplicación al transformador	71
5.8.	El problema de la corriente inrush en transformadores	72
5.9.	Cierre en pico de tensión vs cruce por cero	72
5.10.	Aplicación práctica en relés y SSR	72
5.11.	Sistema para evitar la inrush	73
5.11.1.	Temporizador modelo XTD 316	73
5.11.2.	Justificación técnica de la selección	74
5.12.	Selección del relé de estado sólido Carlo Gavazzi RM1A60D25.....	75

5.12.1. Rele estado sólido con integración cruce por cero	75
5.13. Funcionamiento del circuito.....	76
5.14. Fuente Conmutada de alimentación	76
5.15. Diagrama del circuito	77
5.16. Diagrama del sistema fotovoltaico.....	78
6. CAPITULO VI: RESULTADOS.....	79
6.1. Simulación de la corriente inrush lado 220V.....	79
6.2. Simulación de la corriente inrush y el voltaje fuente.....	80
6.3. Simulación de la corriente sin inrush lado 220V	82
6.4. Corriente de corto circuito del panel solar simulada en ATP-DRAW.....	83
6.5. Simulación de la corriente nominal del panel solar	84
6.6. Voltaje a vacío simulada en ATP.....	85
7. Cronograma.....	86
8. Presupuesto.....	86
9. CAPITULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	87
9.1. Conclusiones	87
9.2. Recomendaciones	88
10. REFERENCIAS	89
ANEXOS	91

ÍNDICE DE IMÁGENES

Ilustración 1. Sistema solar.....	5
Ilustración 2. Radiación solar	6
Ilustración 3. Irradiación solar.....	7
Ilustración 4. Efecto fotovoltaico	7
Ilustración 5. Células fotovoltaico.....	8
Ilustración 6. Conexión de células.....	10
Ilustración 7. Conexión de diodos	11
Ilustración 8. Paneles Solares	11
Ilustración 9. Panel monocristalino	12
Ilustración 10. Panel Policristalino.....	13
Ilustración 11. Panel amorfo.....	13
Ilustración 12. Batería Solar	14
Ilustración 13. Batería litio	14
Ilustración 14. Batería Gel.....	15
Ilustración 15. Batería de flujo redox	16
Ilustración 16. Transformador	17
Ilustración 17. Transformador monofásico	17
Ilustración 18. Corriente inrush.....	18
Ilustración 19. Controlador de carga	19
Ilustración 20. Inversor.....	19
Ilustración 21. Estructura de montaje	20
Ilustración 22. Rele estado solido.....	21
Ilustración 23. Cruce por cero	22
Ilustración 24. Temporizador digital	22
Ilustración 25. Fuente conmutacion de alimentacion	23
Ilustración 26. PVSYST	24
Ilustración 27. ATP DRAW	25
Ilustración 28. Modelado del transformador	32
Ilustración 29. Ventana de parámetros de una fuente de voltaje	34
Ilustración 30. Ventana de parámetros switch.....	35
Ilustración 31. Ventana de atributos del transformador	36

Ilustración 32. Ventana de características del transformador	37
Ilustración 33. Curva de saturación	38
Ilustración 34. Modelado de la intensidad solar	46
Ilustración 35. Ventana de parámetro de fuente de voltaje DC	48
Ilustración 36. Ventana de parámetro resistencia no lineal	48
Ilustración 37. Ventana de característica de la resistencia no lineal	49
Ilustración 38. Curva de 1000W/m ²	50
Ilustración 39. Curva de 800W/m ²	51
Ilustración 40. Curva de 600W/m ²	52
Ilustración 41. Curva de 400W/m ²	54
Ilustración 42. Curva de 200W/m ²	55
Ilustración 43. Diagrama de bloque del sistema fotovoltaico	56
Ilustración 44. Ubicación geográfica de Las Piedras tomada en el software PVSYST	58
Ilustración 45. Promedio mensual de irradiación	59
Ilustración 46. Promedio mensual de irradiación difusa	60
Ilustración 47. Inclinación óptima de los paneles fotovoltaicos PVSYST	60
Ilustración 48. Datos optima de inclinación	61
Ilustración 49. Promedio mensual de temperatura	62
Ilustración 50. Diagrama del grupo de paneles	63
Ilustración 51. Diagrama de grupo de batería.....	68
Ilustración 52. Diagrama del inversor	71
Ilustración 53. Diagrama del transformador	71
Ilustración 54. Temporizador XTD-316.....	73
Ilustración 55. Relé de estado sólido RM1A60D25	75
Ilustración 56. Fuente conmutada de alimentación	76
Ilustración 57. Diagrama del sistema de evitar la inrush.....	77
Ilustración 58. Diagrama del sistema fotovoltaico	78
Ilustración 59. Corriente de irrupción en transformador alimentado en 220 V.....	79
Ilustración 60. Corriente de irrupción y voltaje de alimentación del transformador.....	80
Ilustración 61. Corriente en el lado de 220 V sin presencia de inrush	82
Ilustración 62. Corriente de cortocircuito para diferentes niveles de irradiancia solar. .	83
Ilustración 63. Corriente de operación nominal para diferentes niveles de irradiancia solar.	84

Ilustración 64. Voltaje vacío del fotovoltaico bajo diferentes niveles de irradiancia.....	85
Ilustración 65. Hoja técnica del módulo fotovoltaico monocristalino Vertex.....	91
Ilustración 66. Batería de fosfato de hierro y litio de 36 V y 50 Ah, marca IMPROVE.	92
Ilustración 67. Controlador MPPT de alta tensión con rango de entrada de 192 V a 500 V DC.....	92
Ilustración 68. Inversor híbrido residencial Sol-Ark de 15 kW.	94
Ilustración 69. Transformador 15kVA	94

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Especificaciones del transformador.....	26
Tabla 2. Especificaciones del panel.....	39
Tabla 3. Irradiación solar.....	59
Tabla 4. Especificaciones del regulador de carga.....	64
Tabla 5. Especificaciones de la batería.....	66
Tabla 6. Especificaciones del inversor	68
Tabla 7. Presupuesto.....	86

RESUMEN

El presente trabajo de tesis tiene como objetivo principal analizar la factibilidad técnica de alimentar un transformador monofásico de 15 kVA, con una relación de voltaje de 2400 V/220 V, mediante un sistema fotovoltaico como fuente de energía principal. La propuesta se basa en diseñar un sistema solar capaz de suministrar la potencia requerida por el transformador, considerando las condiciones eléctricas de operación y los niveles de carga.

Para el análisis del recurso solar, se empleará el software PVSyst, herramienta que permitirá determinar la irradiancia global incidente sobre el plano de los módulos fotovoltaicos, en función de la ubicación geográfica del proyecto. Estos datos son esenciales para estimar la generación anual de energía y dimensionar correctamente el sistema fotovoltaico.

Se desarrollará una simulación en el software ATP-DRAW. En este entorno se modelará únicamente el transformador monofásico bajo condiciones representativas de operación, permitiendo analizar su respuesta frente a diferentes escenarios eléctricos y validar su desempeño técnico.

Este proyecto constituye un aporte significativo al campo de la ingeniería eléctrica, al enfocarse en el análisis y validación de una solución energética alternativa basada en energía solar para alimentar un transformador monofásico.

ABSTRACT

The main objective of this thesis is to analyze the technical feasibility of powering a 15 kVA single-phase transformer, with a voltage ratio of 2400 V/220 V, using a photovoltaic system as the main power source. The proposal is based on designing a solar system capable of supplying the power required by the transformer, considering the electrical operating conditions and load levels.

For the solar resource analysis, PVSyst software will be used. This tool will determine the global irradiance incident on the photovoltaic modules, based on the project's geographic location. This data is essential for estimating annual energy generation and properly sizing the photovoltaic system.

A simulation will be developed using ATP-DRAW software. In this environment, only the single-phase transformer will be modeled under representative operating conditions, allowing for the analysis of its response to different electrical scenarios and the validation of its technical performance.

This project represents a significant contribution to the field of electrical engineering, focusing on the analysis and validation of an alternative energy solution based on solar energy to power a single-phase transformer.

1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. Título

ESTUDIAR LA ALIMENTACIÓN DE UN TRANSFORMADOR MONOFÁSICO DE 15KVA / 2400V / 220V MEDIANTE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO

1.2. Introducción

En la actualidad, el acceso confiable a la energía eléctrica continúa siendo un desafío para numerosos sectores rurales y zonas aisladas del mundo, particularmente en países en desarrollo como Ecuador. A pesar de los avances en infraestructura eléctrica, muchas comunidades todavía enfrentan limitaciones en la cobertura del servicio, inestabilidad en el suministro o costos elevados asociados con la expansión de las redes eléctricas tradicionales. Estas condiciones afectan directamente la implementación y funcionamiento de equipos eléctricos esenciales, como transformadores, cuya operación es clave para la distribución adecuada de la energía en distintos niveles de tensión.

El transformador monofásico de 15 kVA, con una relación de tensión de 2400 V / 220 V, es ampliamente utilizado en aplicaciones donde se requiere elevar y reducir la tensión eléctrica, por ejemplo, para transportar electricidad a larga distancia ya que disminuye las pérdidas de energía durante la transición, para suministrar energía eléctrica a equipos o sistemas eléctricos en diferentes lugares que se requiera.

En contextos donde no se dispone de una red eléctrica convencional confiable, la operación de estos equipos se ve comprometida, lo que limita el desarrollo de actividades productivas, la provisión de servicios básicos y la calidad de vida en general.

1.3. Problema de estudio

En muchos sectores rurales y periféricos, especialmente en países en desarrollo como Ecuador, la disponibilidad de energía eléctrica confiable y continua aún representa un desafío significativo. Las redes de distribución convencionales no siempre logran cubrir estas zonas de manera eficiente, debido a factores como la dispersión geográfica, el alto costo de infraestructura, las dificultades de mantenimiento y las pérdidas por distancia. Esta limitación en el acceso a la electricidad repercute directamente en la calidad de vida

de las comunidades, en la productividad de actividades económicas locales y en el desarrollo de sistemas técnicos que requieren una fuente de energía estable.

Uno de los equipos que depende críticamente de una fuente de alimentación confiable es el transformador monofásico, especialmente en aplicaciones donde se necesita elevar o reducir el voltaje para su uso en instalaciones residenciales, agrícolas o pequeñas industrias. Un transformador monofásico de 15 kVA, con una relación de voltaje de 220 V a 2400 V, requiere condiciones específicas para su operación segura y eficiente. Sin embargo, cuando no se dispone de una red eléctrica adecuada que cumpla con estos requisitos, su uso se vuelve limitado o incluso inviable, afectando directamente los procesos que dependen de dicho equipo.

1.4. Justificación

El acceso a una fuente de energía eléctrica confiable y continua es fundamental para el desarrollo social, económico y tecnológico de cualquier comunidad. Sin embargo, en muchas regiones rurales o apartadas, especialmente en países como Ecuador, la cobertura eléctrica de la red convencional es limitada o inestable, lo que impide el uso eficiente de equipos eléctricos esenciales. Esta situación afecta no solo la calidad de vida de las poblaciones locales, sino también el desarrollo de actividades productivas, educativas y de servicios básicos. Frente a esta realidad, se vuelve urgente y necesario explorar fuentes de energía alternativas, sostenibles y adaptables a contextos con baja infraestructura eléctrica.

En este sentido, la energía solar fotovoltaica representa una alternativa viable, limpia y cada vez más accesible. Gracias al desarrollo tecnológico, los sistemas fotovoltaicos pueden ser diseñados para abastecer distintos tipos de cargas eléctricas, incluso aquellas que requieren niveles de potencia considerables, como los transformadores eléctricos. Un transformador monofásico de 15 kVA, con relación de tensión de 220 V a 2400 V, es fundamental para la elevación o reducción de voltaje en sistemas de distribución eléctrica, y su operación confiable es vital en entornos donde se necesita llevar energía a niveles de tensión específicos para distintos usos.

La presente investigación se justifica en la necesidad de comprobar la viabilidad técnica, operativa y económica de alimentar un transformador de estas características mediante un sistema fotovoltaico. Esta propuesta permitiría superar las barreras impuestas por la falta de una red eléctrica convencional, especialmente en lugares donde el tendido eléctrico no es viable por razones económicas o geográficas. Además, el estudio contribuiría al desarrollo de soluciones energéticas descentralizadas, alineadas con los principios de sostenibilidad ambiental y eficiencia energética.

Desde una perspectiva técnica, el análisis permitirá identificar los requerimientos de diseño de un sistema fotovoltaico capaz de alimentar adecuadamente al transformador, considerando aspectos como el dimensionamiento de los paneles solares, la selección del inversor, la capacidad del banco de baterías y la estabilidad de la tensión y frecuencia de salida.

1.5. Objetivos

1.5.1 Objetivo General:

Analizar la puesta en marcha de un transformador monofásico tipo tanque sumergible mediante la simulación en el software ATP-DRAW, utilizando una fuente fotovoltaica para evaluar su comportamiento de operación.

1.5.2. Objetivos Específicos:

- ✓ Modelar el transformador utilizando el software ATP-DRAW para representar su comportamiento eléctrico en condiciones simuladas.
- ✓ Proponer un sistema fotovoltaico mediante un diseño, capaz de alimentar el transformador un monofásicos.
- ✓ Simular el comportamiento del sistema (fuente y transformador) en ATP-DRAW para su respuesta en condiciones de arranque.

1.6. Marco hipotético

En este estudio, se parte de la premisa de que es posible utilizar un sistema fotovoltaico como fuente principal para alimentar un transformador monofásico de 15 kVA, con

tensiones nominales de entrada y salida de 220 V y 2400 V respectivamente, sin comprometer su funcionamiento técnico ni la estabilidad del suministro energético.

Bajo esta premisa, se plantea un sistema fotovoltaico con los componentes necesarios paneles solares, inversores, baterías, reguladores de carga y protecciones será factible garantizar un suministro eléctrico constante y dentro de los parámetros requeridos para la correcta operación del transformador. Se considera también que el dimensionamiento del sistema solar deberá responder tanto a la demanda de potencia del transformador como a las condiciones ambientales del lugar de implementación, especialmente la radiación solar disponible, la temperatura promedio, y las horas de sol pico.

Asimismo, se hipotetiza que mediante el uso de sistemas de almacenamiento energético (baterías) y dispositivos de regulación adecuados, se podrá compensar la intermitencia de la energía solar, permitiendo así una alimentación continua del transformador, incluso en ausencia de radiación solar directa. También se asume que el sistema podrá operar de forma autónoma, sin depender de la red eléctrica convencional, y que la calidad de la energía (en términos de tensión, frecuencia y estabilidad) será suficiente para no comprometer ni el transformador ni los equipos o sistemas que se encuentren conectados a su salida. En base a estas suposiciones, se busca comprobar si la alimentación de un transformador monofásico de estas características mediante energía solar fotovoltaica es técnicamente viable y operativamente eficiente, especialmente en contextos donde la red eléctrica es limitada o inexistente.

2. CAPITULO II: MARCO TEORICO

2.1. La energía solar

La tierra recibe una gran cantidad de energía del sol cada año, esta es una de las principales fuentes de energía sostenible. Gracias al sol se produce el efecto fotovoltaico, la luz solar puede convertirse en electricidad mediante células fotovoltaicas.

Constante solar: $G_0 = 1.367 \pm 2 \frac{W}{m^2}$

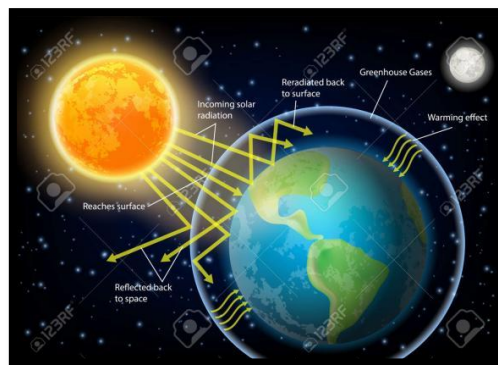


Ilustración 1. Sistema solar

Fuente: google https://st4.depositphotos.com/5524162/20533/v/950/depositphotos_205338230-stock-illustration-greenhouse-effect-diagram-vector-illustration.jpg

2.2. Radiación solar

La radiación solar o radiación electromagnética que viene de la atmósfera a la Tierra, y que proviene de las reacciones nucleares de fusión que ocurren en el Sol. Tipos de radiación solar [1].

La radiación solar incluye los siguientes tipos de radiación:

Rayos infrarrojos: Los rayos infrarrojos son el 49% proporciona de la radiación electromagnética.

Rayos visibles: Es el 43% de radiación y proporcionan luz.

Rayos ultravioletas: se representan el 7% de la radiación solar.

Otros rayos: se presentan aproximadamente el 1% del conjunto.

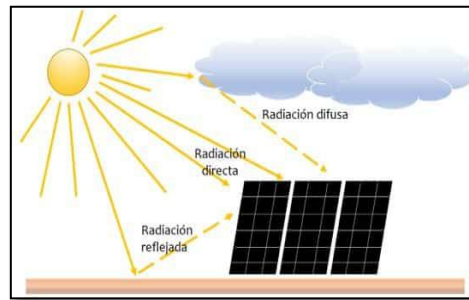


Ilustración 2. Radiación solar

Fuente: <https://www.hogarsense.es/placas-solares/radiacion-solar-directa-e-indirecta>

2.3. Radiación Directa

Se proyecta en la superficie orientada a la superficie y es la parte más intensa y útil de la energía solar para sistemas como la concentración solar que requiere una alta densidad de energía [2].

2.4. Radiación Difusa

Es una cantidad física representativa de la potencia de la radiación solar obtenida en la superficie expuesta de forma vertical a los rayos solares. Además, permite el funcionamiento de sistemas solares incluso en ausencia de exposición solar directa [2].

2.5. Irradiancia solar

La irradiancia solar es una magnitud física que representa la potencia de la radiación solar recibida por unidad de área en una superficie expuesta de forma perpendicular a los rayos solares. Se expresa generalmente en vatios por metro cuadrado (W/m^2) y constituye un parámetro fundamental en el dimensionamiento y evaluación del rendimiento de sistemas de aprovechamiento solar, especialmente en aplicaciones fotovoltaicas y térmicas [3].

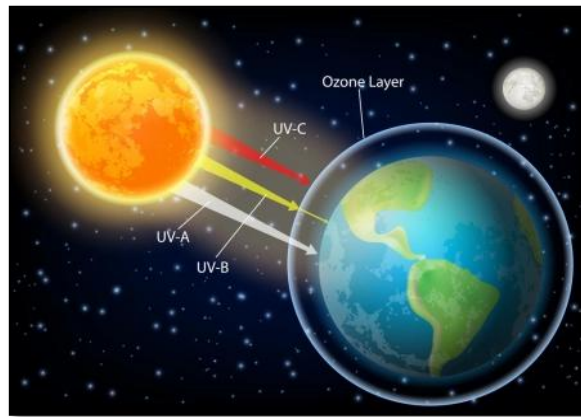


Ilustración 3. Irradiación solar

Fuente: <https://www.byverdleds.com/blog/tipos-de-luz-uv-y-el-poder-esterilizador-de-uv-c.html>

2.6. Efecto fotovoltaico

El físico Alexander Bequerel descubrió el efecto fotovoltaico en 1839, que consiste en la generación de corriente eléctrica mediante ciertos materiales cuando se exponen a radiación electromagnética, sin que intervengan procesos físicos o mecánicos adicionales.

Las aplicaciones más comunes del efecto fotovoltaico son la generación de electricidad mediante paneles solares y células fotovoltaicas. La radiación solar está compuesta por fotones cuya energía depende de la frecuencia de la luz que incide sobre la superficie del material semiconductor. Estos fotones son absorbidos y transfieren su energía a los electrones en la capa externa del material, lo que permite que los electrones se liberen y se desplacen hacia la superficie del metal. Este fenómeno se conoce como fotoemisión [4].

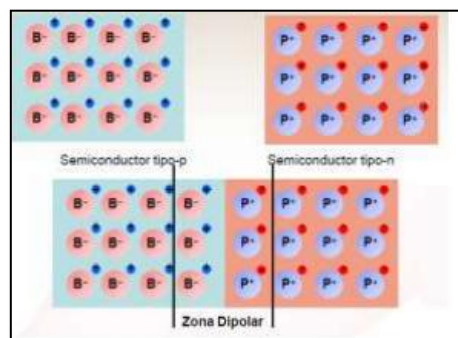


Ilustración 4. Efecto fotovoltaico

Fuente: <https://industrysurfer.com/blog%02industrial/ingenieria/ingenieria-electrica-ingenieria/hogar/como-hacer-una-celda-solar%02simple-como-funcionan-las-celdas-solares/>

2.7. Funcionamiento de células fotovoltaicas

Si combinamos ambas estructuras, se logrará captar la energía de los fotones del sol en el silicio tipo n. Esta energía será absorbida, lo que generará un electrón libre que se desplazará, a través del bus, hacia los huecos libres en los átomos del silicio tipo p.

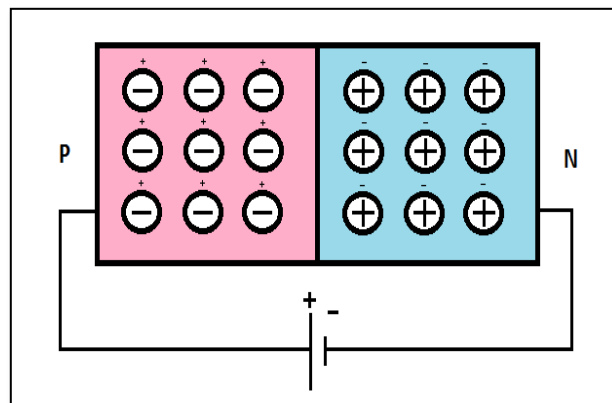


Ilustración 5. Células fotovoltaico

Fuente: <https://ingelibreblog.wordpress.com/2014/09/29/union-pn/>

2.8. Clasificación de células fotovoltaicas

Las células fotovoltaicas se clasifican según la estructura interna se puede realizar la siguiente clasificación [5]:

2.9. Células monocristalinas

Son células hechas de materiales monocristalinos, los cuales se crean a partir de una semilla que tiene una estructura cristalina específica. Después de formar este material monocristalino, se corta en obleas y se dopan mediante difusiones para generar una unión p-n que funcione como semiconductor. Este tipo de células se distingue por su alta eficiencia energética, aunque su proceso de fabricación es costoso y lento.

2.10. Células multicristalinas o policristalinas

Las células policristalinas están hechas de materiales que contienen pequeños cristales de silicio, con un nivel de impurezas de una parte por billón o menos. Estas células tienen una estructura multicristalina, formada por numerosos cristales de gran tamaño con una

orientación aleatoria. Aunque su eficiencia energética es inferior a la de las células monocristalinas varía entre el 12% y el 21%, su proceso de fabricación es más rápido y económico.

2.11. Células híbridas

Las células compuestas por diferentes materiales se conocen como híbridas. Este diseño favorece la absorción y el transporte de electrones, lo que mejora sus propiedades eléctricas. Estas células están formadas por sustratos o capas monocristalinas a las que se les incorpora una capa de material policristalino.

2.12. Células amorfas

Las células amorfas están compuestas por una delgada capa de silicio amorfo, cuya estructura interna no sigue un patrón ordenado de átomos. Como resultado, estas células tienen una eficiencia relativamente baja.

2.13. Conexión de células

Una de las características más importantes y al mismo tiempo una limitación de la conexión en serie de celdas fotovoltaicas es que, si una de ellas presenta una falla (como una celda defectuosa o parcialmente sombreada), el flujo de corriente en todo el circuito se interrumpe. Es decir, el funcionamiento del conjunto completo depende del estado de cada componente. Este tipo de conexión presenta una desventaja crítica: el fallo de una sola celda puede inutilizar toda la cadena. Para mitigar este problema, se recomienda incorporar diodos de bypass en paralelo con cada celda, los cuales permiten que la corriente eluda la celda defectuosa y continúe su recorrido, evitando así la pérdida total de producción. La figura a continuación representa este principio: [6]

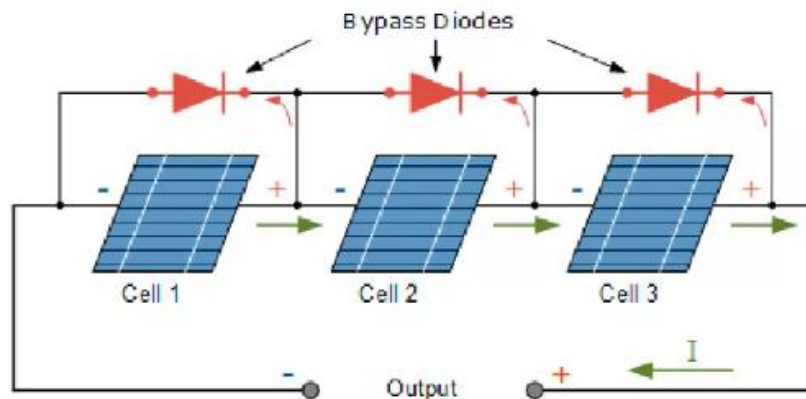


Ilustración 6. Conexión de células

Fuente: <https://material-electrico.cdcomunicacion.es/opinion/ignacio-martil/2023/11/15/estructura-y-peculiaridades-de-los-paneles-fotovoltaicos-estandares>

2.14. Conexión de los diodos de derivación

Instalar un diodo de derivación en cada célula individual de un panel fotovoltaico no solo sería costoso, sino también técnicamente complejo, lo cual elevaría considerablemente el precio del panel. Por este motivo, en lugar de proteger cada célula de forma individual, se agrupan varias células en secciones y se instala un diodo de derivación por cada grupo. Tal como se observa en la imagen, las células del panel se dividen en tres bloques independientes, y a cada uno se le asigna un diodo de derivación.

De este modo, si una de las células del grupo central deja de funcionar (por ejemplo, debido a que una hoja proyecta sombra sobre ella), solo ese segmento se verá afectado, mientras que los otros dos continuarán operando con normalidad. Esto es posible gracias a la función del diodo de derivación, que permite que la corriente evite la sección afectada mediante un "bypass"[6].

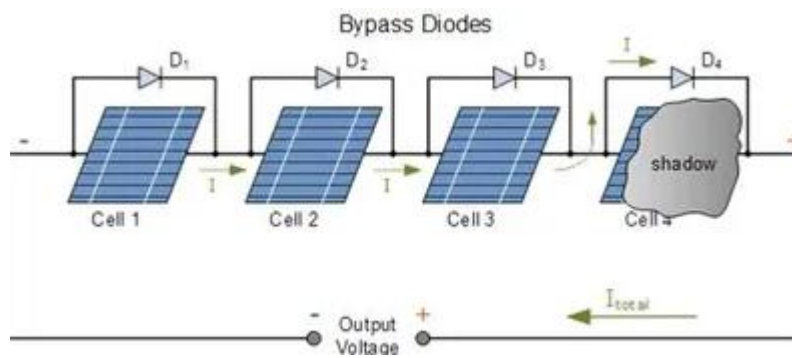


Ilustración 7. Conexión de diodos

Fuente: https://es.made-in-china.com/co_citcorp/product_Bypass-Diodes-for-Solar_heroreieu.html

2.15. Paneles solares

Un panel solar, también denominado módulo fotovoltaico, es un dispositivo tecnológico compuesto por celdas fotovoltaicas que permiten la conversión directa de radiación solar en electricidad a través del efecto fotovoltaico [7]. Estos sistemas están formados, en su mayoría, por materiales semiconductores como el silicio cristalino (monocristalino o policristalino) o compuestos de capa fina, los cuales generan una corriente eléctrica al ser expuestos a la luz solar [8].



Ilustración 8. Paneles Solares

Fuente: <https://www.xatakahome.com/iluminacion-y-energia/comunidades-solares-asi-permiten-pagar-factura-energetica-iberdrola-tiene-listas-doce-nuevas-andalucia>

2.16. Tipos de paneles solares

Existen diferentes tipos de paneles solares, cada uno con características específicas según su tecnología. Los más comunes son los monocristalinos, que ofrecen alta eficiencia y durabilidad; los policristalinos, más económicos, pero ligeramente menos eficientes; y los de capa delgada, que son flexibles y livianos, ideales para aplicaciones especiales, aunque con menor rendimiento. La elección del tipo de panel depende del espacio disponible, el presupuesto y las condiciones de instalación.

2.16.1. Paneles Monocristalinos

El panel solar monocristalino es el más eficiente, con un rendimiento comercial que va del 17% al 20%. Debido a su alta eficiencia, es también el más costoso [9].

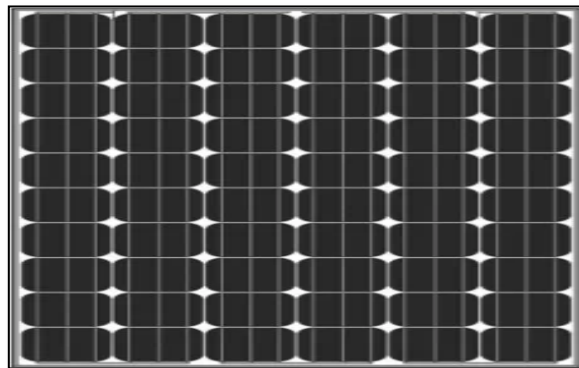


Ilustración 9. Panel monocristalino

Fuente: <https://www.weamerisolar.eu/es/los-mejores-paneles-solares/paneles-solares-transparentes/>

2.16.2. Paneles Policristalinos

El panel solar policristalino es el más común en la actualidad debido a su bajo costo. Su eficiencia varía entre el 13% y el 15% [9].

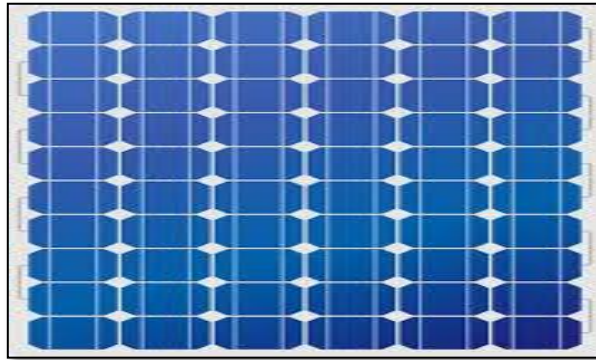


Ilustración 10. Panel Policristalino

Fuente: https://www.freepik.es/vector-premium/ilustracion-vector-panel-solar-sobre-fondo-blanco_64716182.htm

2.16.3. Paneles de amorfo

Estos paneles van del 7% al 9%. Aunque su costo es bajo, su bajo rendimiento significa que rara vez se usan [9].

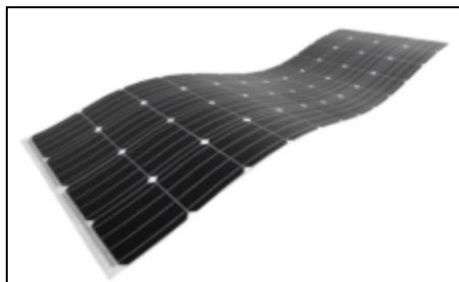


Ilustración 11. Panel amorfo

Fuente: <https://energytec.es/30-paneles-solares-flexibles>

2.17. Batería solar

Una batería solar es un dispositivo electroquímico diseñado para almacenar la energía eléctrica generada por sistemas fotovoltaicos, permitiendo su utilización en momentos en los que no hay producción directa de energía solar, como durante la noche o en condiciones de baja irradiación [10]. Estas baterías son componentes esenciales en sistemas solares autónomos o híbridos, ya que aseguran la continuidad del suministro energético y mejoran la estabilidad del sistema [11].



Ilustración 12. Batería Solar

Fuente: <https://luxpowertek.com/es/blog/como-calcular-la-bateria-del-panel-solar-y-el-inversor/>

2.17.1. Batería de litio

Una batería de litio es un dispositivo electroquímico de almacenamiento de energía que utiliza compuestos de litio como uno de sus elementos activos en el proceso de carga y descarga. Estas baterías se caracterizan por su alta densidad energética, bajo peso, vida útil prolongada y baja tasa de autodescarga. Dependiendo de su composición química, pueden clasificarse en diversas variantes, como ion de litio (Li-ion), polímero de litio (LiPo) o fosfato de hierro y litio (LiFePO₄). Su funcionamiento se basa en el movimiento reversible de iones de litio entre el ánodo y el cátodo a través de un electrolito, durante los procesos de carga y descarga. Las baterías de litio son ampliamente utilizadas en dispositivos electrónicos portátiles, vehículos eléctricos, equipos médicos y sistemas de respaldo energético por su eficiencia y confiabilidad [12].



Ilustración 13. Batería litio

Fuente: <https://gumercamperaccesorios.com/baterias/1937-bateria-litio-100ah-litr-ion-energy.html>

2.17.2. Batería de gel

Las baterías solares de gel son una variante de las baterías de plomo-ácido reguladas por válvula (VRLA) que utilizan un electrolito en forma de gel, resultado de mezclar ácido sulfúrico con sílice, lo cual inmoviliza el electrolito y evita fugas. Esto permite descargas profundas (hasta el 60–80 %) sin comprometer su vida útil. Son ideales para aplicaciones donde el mantenimiento es difícil, ya que no requieren rellenado de agua, y ofrecen una baja tasa de autodescarga, lo que las hace adecuadas incluso en instalaciones remotas.

Funcionan mediante reacciones electroquímicas en el gel: durante la carga, los iones de plomo y oxígeno reaccionan en los electrodos, y durante la descarga se invierte este proceso, generando corriente eléctrica [13].



Ilustración 14. Batería Gel

Fuente: <https://www.visionled.com.ec/product/bateria-de-gel-12v-para-sistemas-solares-50ah/?srsltid=AfmBOor1epAcYJdZwC1-YhifutVWoJbcfdqFkBO0-fuXgHwEPOasx8zG>

2.17.3. Batería de flujo redox

Las baterías de flujo redox (del inglés *Redox Flow Batteries*, RFB) son sistemas electroquímicos de almacenamiento energético en los que los reactivos (electrolitos) se almacenan en tanques externos y circulan a través de una celda electroquímica para realizar procesos de oxidación y reducción. A diferencia de las baterías convencionales, donde la energía se almacena en los electrodos, en las baterías de flujo la energía se almacena en forma líquida en los electrolitos, lo que permite escalar la capacidad energética simplemente aumentando el tamaño de los tanques [14].

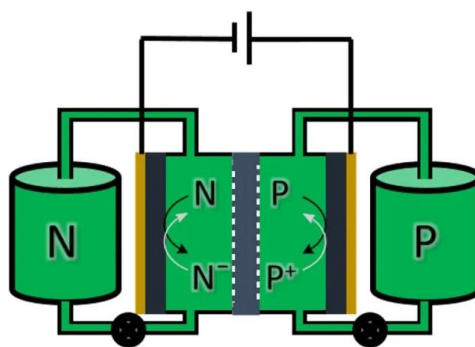


Ilustración 15. Batería de flujo redox

Fuente: <https://www.quimica.es/noticias/1175251/una-nueva-bateria-de-flujo-almacena-energia-en-un-simple-compuesto-organico.html>

2.18. Transformador

Un transformador es un equipo eléctrico diseñado para transmitir energía de un circuito a otro mediante un flujo magnético. Su estructura incluye un núcleo de material ferromagnético y dos devanados: el primario, que recibe la energía de entrada, y el secundario, que proporciona la energía transformada a la salida.

Su función principal es cambiar el voltaje de la corriente alterna, ya sea aumentándolo o reduciéndolo, sin modificar su frecuencia ni su tipo. Esto se hace para facilitar el transporte de electricidad: se usan voltajes altos para enviarla a largas distancias con menos pérdidas, y voltajes bajos para que pueda usarse de forma segura en casas e industrias.

El transformador funciona gracias a la ley de Faraday, que dice que una variación en el campo magnético puede generar voltaje en un conductor. Así, cuando pasa corriente alterna por la bobina primaria, se crea un campo magnético cambiante que induce una corriente en la bobina secundaria.

Hay varios tipos de transformadores, dependiendo de su uso, del número de fases que manejan o de su función específica. Entre ellos están los transformadores de potencia, de distribución, de medida, de aislamiento, entre otros [15].



Ilustración 16. Transformador
Fuente <https://ceica.com/product/transformadores-tipo-poste/>

2.18.1. Transformador monofásico

Un transformador monofásico es una máquina eléctrica estática que permite transferir energía eléctrica entre dos circuitos de corriente alterna a diferentes niveles de tensión, manteniendo la misma frecuencia. Está compuesto principalmente por un núcleo ferromagnético y dos devanados: el primario, que recibe la energía, y el secundario, que la entrega. Su funcionamiento se basa en el principio de inducción electromagnética, donde la variación del flujo magnético producido por el devanado primario induce una tensión en el devanado secundario. Estos transformadores son comúnmente utilizados en redes de distribución eléctrica para suministrar energía a viviendas, oficinas y pequeñas industrias [16].



Ilustración 17. Transformador monofásico
Fuente: <https://portotransformadores.com/productos/transformador-monofasico-tipo-poste/>

2.19. Corriente inrush

La corriente inrush, también conocida como corriente de irrupción o corriente de arranque, es el pico de corriente inicial que fluye hacia un dispositivo eléctrico o electrónico al momento de su energización, especialmente en sistemas con componentes inductivos o capacitivos. Esta corriente puede superar varias veces la corriente nominal durante un corto intervalo de tiempo (milisegundos a segundos), lo que puede ocasionar disparos intempestivos de protecciones o daños en componentes sensibles [17].

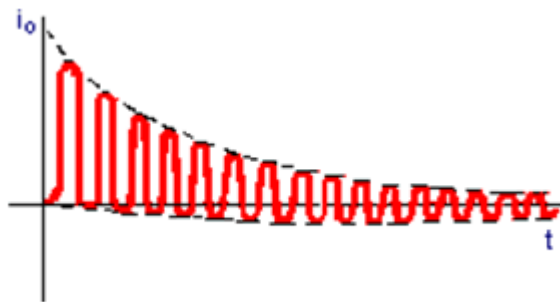


Ilustración 18. Corriente inrush

Fuente: <https://imseingenieria.blogspot.com/2015/07/corriente-transitoria-de-conexion-o.html>

2.20. Controlador de carga

El controlador de carga, también conocido como regulador de carga solar, es un dispositivo electrónico que gestiona el flujo de energía eléctrica entre los paneles solares, las baterías y la carga del sistema, con el objetivo principal de proteger las baterías contra sobrecargas, sobredescargas y otros fenómenos eléctricos que puedan reducir su vida útil o comprometer su funcionamiento. Este componente es esencial en los sistemas fotovoltaicos autónomos y desempeña un papel clave en la eficiencia y seguridad del almacenamiento energético [18].



Ilustración 19. Controlador de carga

Fuente: <https://www.lacobacha.com.ec/producto/controlador-de-carga-panel-solar-60a/>

2.21. Inversores

Este dispositivo, conocido como inversor fotovoltaico, tiene como función principal convertir la corriente continua (CC) generada por los paneles solares en corriente alterna (CA), que es la forma de energía eléctrica utilizada en hogares, industrias y comercios. Hay muchos tipos y escala diferentes de los inversores, y su elección depende de la cantidad de tablas y tamaño del sistema. Los modelos más grandes se utilizan en grandes estructuras solares, mientras que pequeño es común en los sistemas domésticos [19].



Ilustración 20. Inversor

Fuente: <https://ircinor.com/product/xmart-inversor-solar-xsi-3k-2-4kw-120v-24vdc-mppt-80a-ac/>

2.22. Estructura de montaje

La instalación de sistemas fotovoltaicos constituye una solución eficiente para la generación de energía a partir de la radiación solar. No obstante, el desempeño del sistema no solo depende de la calidad de los módulos o del inversor, sino que está directamente relacionado con el diseño estructural del soporte. Una estructura de montaje bien diseñada y correctamente instalada es esencial para optimizar la captación de energía solar, reducir

las pérdidas por sombreado y asegurar la estabilidad mecánica del sistema frente a cargas como viento, nieve u otros factores ambientales. El diseño considera parámetros como la orientación, el ángulo de inclinación, la carga estructural admisible del techo o terreno, y los coeficientes de seguridad normalizados. Todo este proceso es llevado a cabo por un equipo técnico especializado, que evalúa las condiciones particulares del sitio y asegura que la estructura cumpla con los criterios de eficiencia, resistencia y durabilidad exigidos en proyectos solares de alto rendimiento [21].



Ilustración 21. Estructura de montaje

Fuente: <https://www.efcsolar.com/energia-solar-fotovoltaica/estructuras-para-paneles-solares-tipos/>

2.23. Relé estado sólido

Un relé de estado sólido es un interruptor controlado electrónicamente que puede encender o apagar una carga eléctrica en respuesta a una señal de control. A diferencia de los relés electromecánicos (que dependen del movimiento físico de un contacto), los SSR realizan el cambio de estado mediante la activación de un componente semiconductor. Esto ofrece múltiples ventajas: alta velocidad de conmutación, mayor durabilidad (al no haber desgaste mecánico), ausencia de ruido eléctrico o mecánico, y funcionamiento confiable incluso en entornos adversos con polvo, vibraciones o humedad. [21].



Ilustración 22. Rele estado solido

Fuente: https://static.wixstatic.com/media/a0d5c3_c6f3fdb0d10742bc9de23d05ef8aeabf~mv2.jpg/v1/fill/w_622,h_595,al_c,q_85,enc_avif,quality_auto/a0d5c3_c6f3fdb0d10742bc9de23d05ef8aeabf~mv2.jpg

2.24. Control cruce por cero

El control por cruce por cero es una técnica de conmutación electrónica utilizada en circuitos de corriente alterna (CA) que permite conectar o desconectar una carga justo en el momento en que la tensión de la red eléctrica pasa por el valor cero. Este instante, conocido como "cruce por cero" o zero crossing, ocurre dos veces por cada ciclo de la señal de CA (una al pasar de positivo a negativo y otra en sentido inverso), es decir, 100 veces por segundo en redes de 50 Hz y 120 veces por segundo en redes de 60 Hz.

La conmutación en este punto específico reduce de forma significativa los efectos negativos que suelen presentarse cuando se energizan cargas eléctricas, como la corriente de irrupción (inrush current), los transitorios de tensión, el desgaste prematuro de componentes y la generación de interferencias electromagnéticas (EMI). Esta técnica se implementa comúnmente en dispositivos como relés de estado sólido (SSR), contactores electrónicos, dimmers, inversores y controladores de carga, especialmente en aplicaciones industriales, residenciales y de automatización [22].

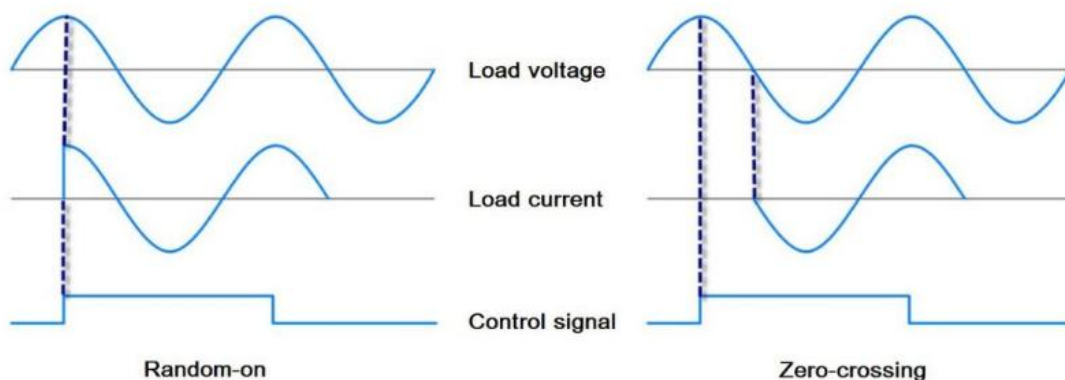


Ilustración 23. Cruce por cero

Fuente: <https://www.omchsmmps.com/es/zero-crossing-solid-state-relay/>

2.25. Temporizador digital

Un temporizador digital es un dispositivo electrónico programable que permite controlar el tiempo de conexión o desconexión de un circuito eléctrico de forma precisa y automatizada. A diferencia de los temporizadores mecánicos, los temporizadores digitales utilizan componentes electrónicos como microcontroladores y circuitos integrados para medir intervalos de tiempo, los cuales pueden configurarse en segundos, minutos, horas o incluso días. Este tipo de dispositivo se emplea ampliamente en sistemas de automatización industrial, control de procesos, iluminación programada, y secuencias temporizadas de máquinas eléctricas. Además, muchos temporizadores digitales cuentan con funciones adicionales como múltiples rangos de tiempo, salidas por relé y pantallas LCD para facilitar su configuración y monitoreo [23].



Ilustración 24. Temporizador digital

Fuente: <https://www.steren.com.ec/temporizador-timer-digital-industrial-de-2-canales.html>

2.26. Fuente de alimentación conmutada

Una fuente de alimentación conmutada, también conocida como fuente SMPS (Switch Mode Power Supply), es un dispositivo electrónico cuya función principal es transformar la energía eléctrica de entrada en una tensión de salida regulada, mediante el uso de dispositivos de conmutación electrónica que operan a alta frecuencia. A diferencia de las fuentes de alimentación lineales, que regulan la tensión mediante disipación de energía, las fuentes conmutadas utilizan transistores que trabajan como interruptores controlados electrónicamente, logrando una conversión más eficiente y con menor generación de calor.

El principio de funcionamiento de una fuente conmutada se basa en la conversión inicial de la tensión de entrada (ya sea corriente alterna o continua) en corriente continua, seguida de una etapa de conmutación de alta frecuencia. Posteriormente, esta señal es transformada y rectificadas nuevamente para proporcionar una salida estable. Gracias a la alta frecuencia de conmutación, los transformadores y componentes magnéticos utilizados pueden ser más pequeños y ligeros, lo que permite una considerable reducción en tamaño y peso del sistema [24].



Ilustración 25. Fuente conmutacion de alimentacion

Fuente: <https://www.sicoelecgroup.com/producto/fuentes-de-alimentacion-conmutada/>

2.27. PVSYST

PVsyst es un programa especializado que se usa para estudiar, diseñar, simular y evaluar sistemas de energía solar fotovoltaica. Fue creado por la Universidad de Ginebra, en Suiza, y es muy utilizado por profesionales del sector solar, como ingenieros, diseñadores e investigadores. Este software permite simular distintos tipos de sistemas solares:

conectados a la red eléctrica, independientes (off-grid), combinados con otras fuentes de energía (híbridos) y sistemas de bombeo solar. Su función principal es ofrecer herramientas precisas para analizar el rendimiento energético, técnico y económico de una instalación solar, considerando aspectos como el clima local, las características del lugar y los equipos usados (como paneles e inversores). [25].



Ilustración 26. PVSYS

Fuente: https://list.solar/images/sections/15/20210225/s0_4999.png

2.28. ATP DRAW

ATP-Draw es un software que funciona como una interfaz gráfica de usuario diseñada para facilitar el uso del programa ATP (Alternative Transients Program), el cual es ampliamente utilizado para realizar simulaciones de transitorios electromagnéticos y análisis en sistemas de potencia. Mientras que ATP originalmente requiere que los usuarios escriban los modelos en un lenguaje específico de entrada, ATP-Draw ofrece una forma más accesible y visual de trabajar con este potente motor de simulación.

Con ATP-Draw, los usuarios pueden crear esquemas eléctricos complejos mediante diagramas gráficos, lo que hace más intuitivo el proceso de diseño y configuración de los circuitos. Esta interfaz permite seleccionar y colocar elementos del sistema eléctrico como transformadores, líneas de transmisión, generadores, interruptores, resistencias, entre otros directamente en el área de trabajo, conectarlos entre sí y ajustar sus parámetros fácilmente.

El uso de ATP-Draw reduce significativamente los errores de codificación y acelera el proceso de modelado, especialmente útil en estudios donde se requiere precisión en la simulación de fenómenos transitorios, como maniobras de conmutación, fallas eléctricas, descargas atmosféricas o análisis de protecciones. Esto lo convierte en una herramienta clave tanto en el ámbito académico como en la industria eléctrica para la investigación,

el desarrollo y la validación de sistemas eléctricos bajo diferentes condiciones operativas [26].



Ilustración 27. ATP DRAW

Fuente: <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQ2RCYh96SSQdGnzaB--jyZ1hUUjG0t3SKRfA&s>

3. CAPITULO III: Modelado del transformador monofásico

En esta parte se detallan los procedimientos técnicos, parámetros eléctricos y cálculos fundamentales empleados para el análisis del transformador monofásico objeto de estudio. Esta sección se enfoca principalmente en determinar las características de operación del transformador, así como en el cálculo de la corriente nominal, las pérdidas y los valores requeridos para construir la curva de magnetización.

3.1. Especificaciones del Transformador

El transformador utilizado para esta investigación presenta las siguientes características:


<p>Marca: ECUATRAN</p> <p>Potencia nominal: 15 KVA</p> <p>Tensión primaria: 2400 V</p> <p>Tensión secundaria: 220 V</p> <p>Frecuencia: 60 Hz</p> <p>Tipo: Monofásico</p> <p>A.prim: 6.25 A</p> <p>A.Sec: 135/63.2 A</p>	
---	---

Tabla 1. Especificaciones del transformador

Fuente: Fotografía propia del transformador

3.1.1. Parámetros Eléctricos Clave

Los parámetros eléctricos obtenidos del fabricante o mediante pruebas son los siguientes:

Impedancia de cortocircuito (Z_{cc}): 1,7 %

Resistencia en cortocircuito (R_{cc}): 0,6 %

Corriente de vacío (I_o): 2 %

Pérdidas en vacío (P_o): 60 W

Estos valores son fundamentales para realizar los cálculos de corriente nominal, pérdidas y posteriormente la determinación de la curva de magnetización del núcleo.

3.2. Cálculo de la Corriente Nominal

La corriente nominal de un transformador es la corriente máxima que puede circular por sus devanados (primario o secundario) bajo condiciones normales de operación, cuando el transformador entrega su potencia nominal a la tensión nominal.

Esta corriente se calcula a partir de la potencia aparente nominal del transformador y la tensión nominal del devanado correspondiente.

Formula:

$$I = \frac{S}{V}$$

Corriente nominal en alta (AT)

$$I_{\text{nom.AT}} = \frac{15000}{2400} = 6,25 \text{ A}_{\text{RMS}}$$

Corriente nominal en baja (BT)

$$I_{\text{nom.BT}} = \frac{15000}{220} = 68,1819 \text{ A}_{\text{RMS}}$$

3.3. Cálculo de la Corriente a Vacío

La corriente de vacío representa el valor de corriente que circula en el primario del transformador cuando el secundario se encuentra en circuito abierto. Esta corriente corresponde principalmente al vacío del núcleo y es un parámetro clave para el cálculo de la curva de magnetización.

$$I_{\text{o.rms. AT}} = \frac{2}{100} * 6,25 = 0,125 \text{ Arms}$$

$$I_{o,rms. AT} = \frac{2}{100} * 68,18 = 1.36 \text{ Arms}$$

3.4. Corriente Pico

La corriente pico a vacío de un transformador corresponde al valor máximo instantáneo de la corriente que circula por el devanado primario cuando el transformador está energizado sin carga (es decir, en vacío). Este valor se obtiene multiplicando la corriente eficaz (RMS) por la raíz cuadrada de dos, bajo el supuesto de que la señal es senoidal pura:

$$I_{o.pico} = I_{rms} \times \sqrt{2}$$

Corriente pico en lado de alta Tensión (AT)

$$I_{o.pico. AT} = (0.125) \times \sqrt{2} = 0.18 \text{ A. pico}$$

Corriente pico en lado de baja Tensión (BT)

$$I_{o.pico. BT} = (1.36) \times \sqrt{2} = 1.92 \text{ A. pico}$$

3.5. Cálculo del Flujo Magnético a Vacío

El flujo magnético a vacío representa la magnitud del flujo en el núcleo cuando el transformador está energizado sin carga conectada. Se determina a partir de la tensión aplicada, y permite conocer el punto de operación magnética del núcleo. Para una señal senoidal, este flujo máximo se obtiene a partir del valor RMS de la tensión aplicada:

$$\emptyset = \frac{V * \sqrt{2}}{2\pi * f}$$

Flujo a Vacío en el Devanado de Alta Tensión (AT)

Al aplicar la fórmula con los parámetros del primario 2400 V, se obtiene:

$$\emptyset_{vacio.AT} = \frac{2400 \times \sqrt{2}}{2\pi \times 60} = 9,0031 \text{ wb}$$

Flujo a Vacío en el Devanado de Baja Tensión (BT)

De manera análoga, al aplicar la tensión secundaria:

$$\emptyset_{\text{vacio.BT}} = \frac{220 \times \sqrt{2}}{2\pi \times 60} = 0,8253 \text{ wb}$$

3.6. Impedancia Base

La impedancia base es un valor de referencia normalizado que se utiliza en sistemas eléctricos para convertir magnitudes reales a valores por unidad (p.u.), lo cual permite comparar fácilmente diferentes equipos o partes del sistema, independientemente de sus niveles de tensión o potencia.

Esta impedancia depende directamente de la potencia base y la tensión base seleccionadas para el análisis, y sirve como escala común para el cálculo de impedancias relativas en estudios de flujo de carga, cortocircuito y estabilidad:

$$Z.\text{base} = \frac{V^2}{S}$$

Impedancia base en lado de Alta tensión (AT):

$$Z.\text{base(AT)} = \frac{2400^2}{15000} = 384 \Omega$$

Impedancia base en lado de baja tensión (BT):

$$Z.\text{base(BT)} = \frac{220^2}{15000} = 3,23 \Omega$$

3.7. Cálculo de la Impedancia Propia del Transformador

La impedancia propia del transformador es un parámetro crucial para modelar su comportamiento ante cargas. Se compone de una parte resistiva (pérdidas en el cobre) y una parte reactiva (asociada al flujo de dispersión). Estos valores pueden expresarse tanto del lado de media como de baja tensión y se obtienen a partir de las impedancias base y los porcentajes entregados por el fabricante.

$$Z_{cc} = \frac{Z\% * Z.base}{100 * 2}$$

Impedancia propia en lado de alta tensión (AT):

$$Z_{cc.AT} = \frac{1,7}{100} \times \frac{384}{2} = 3,26 \Omega$$

Impedancia propia en lado de baja tensión (BT):

$$Z_{cc.BT} = \frac{1,7}{100} \times \frac{3,23}{2} = 0,027\Omega$$

3.8. Resistencia de Cortocircuito (Rcc)

La resistencia de cortocircuito Rcc representa la componente activa de la impedancia equivalente del transformador bajo prueba de cortocircuito. Esta resistencia está asociada a las pérdidas en los devanados por el efecto Joule, es decir, el calor generado cuando la corriente fluye por los conductores internos del transformador. Para calcular, se utiliza el porcentaje de resistencia proporcionado por el fabricante junto con la impedancia base del sistema:

$$R_{cc} = \frac{R\% \times Z.base}{100 \times 2}$$

Resistencia de cortocircuito en alta tensión (AT):

$$R_{cc.AT} = \frac{0,6}{100} \times \frac{384}{2} = 1,1520\Omega$$

Resistencia de cortocircuito en baja tensión (BT):

$$R_{cc.BT} = \frac{0,6}{100} \times \frac{3,23}{2} = 0,00969 \Omega$$

3.9. Reactancia de Cortocircuito (Xcc)

La reactancia de cortocircuito representa la componente inductiva de la impedancia equivalente de un transformador. Está asociada al flujo de dispersión que no se acopla

entre los devanados primario y secundario, y causa una caída de tensión adicional cuando el transformador está cargado.

Una vez conocidas la impedancia total y la resistencia de cortocircuito, la reactancia puede calcularse mediante el teorema de Pitágoras aplicado al triángulo de impedancias:

$$X_{cc} = \sqrt{Z_{cc}^2 - R_{cc}^2}$$

Reactancia de cortocircuito alta tensión (AT):

$$X_{cc.AT} = \sqrt{3,26^2 - 1,1520^2} = j3,05395 \Omega$$

Reactancia de cortocircuito baja tensión (BT):

$$X_{cc.BT} = \sqrt{0,027^2 - 0,00969^2} = j0,0256 \Omega$$

3.10. Inductancia de Dispersión (Lcc)

La inductancia de dispersión Lcc representa el efecto inductivo asociado al flujo de dispersión en un transformador. Este flujo es el que no se acopla entre los devanados primario y secundario y circula por trayectorias no deseadas. Aunque no contribuye al acoplamiento magnético útil, influye directamente en el comportamiento de la impedancia y las caídas de tensión en carga.

La relación entre la reactancia y la inductancia está dada por:

$$L_{cc} = \frac{X_{cc}}{2\pi * f}$$

Inductancia de dispersión en alta tensión (AT):

$$L_{cc} = \frac{3,05395}{2\pi \times 60} = 0,008090 \text{ H} = 8.1 \text{ mH}$$

Inductancia de dispersión en baja tensión (BT):

$$L_{cc} = \frac{0,0250}{2\pi \times 60} = 0,00006684 \text{ H} = 0,0668 \text{ mH}$$

3.11. Cálculo de la Resistencia de Magnetización

La resistencia de magnetización (R_m) representa las pérdidas en el núcleo del transformador bajo condiciones de vacío, como resultado de los efectos de histéresis y corrientes parásitas. Se ubica en paralelo con la reactancia de magnetización en el modelo equivalente.

$$R_m = \frac{V^2}{P_0}$$

R_m para el Devanado de Alta Tensión (AT)

$$R_{m.AT} = \frac{2400^2}{60} = 96000 \Omega$$

R_m para el Devanado de Baja Tensión (BT)

$$R_{m.BT} = \frac{220^2}{60} = 806,667 \Omega$$

3.12. Modelo en ATP-DRAW del transformador

Para representar el estudio del comportamiento del transformador monofásico tipo tanque sumergible de 15 kVA (220 V / 2400 V), se utilizó el software ATP-Draw, una interfaz gráfica del programa de simulación ATP. Esta herramienta permite el análisis detallado de sistemas eléctricos ante distintos fenómenos transitorios, como corrientes de energización, saturación del núcleo, pérdidas en vacío y comportamiento en carga.

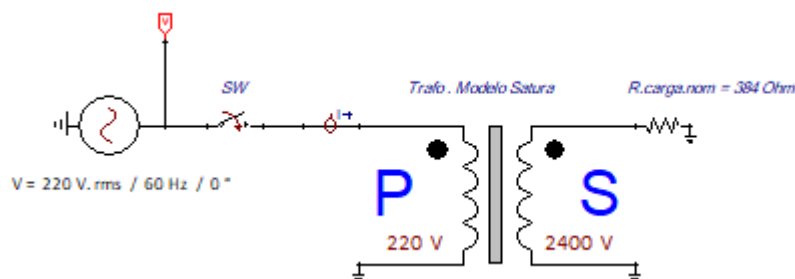


Ilustración 28. Modelado del transformador
Fuente: Adaptación propia del autor

3.12.1. Parámetros considerados para la simulación

En el entorno de ATP-Draw se implementó el modelo saturable del transformador, el cual incorpora la no linealidad del núcleo magnético mediante una tabla de magnetización. Se emplearon los siguientes valores obtenidos de pruebas de laboratorio y especificaciones técnicas:

- Impedancia de cortocircuito (Z_{cc}): 1.7 %
- Resistencia del devanado de baja tensión (R 220 V): 0.0097 Ohm
- Inductancia del devanado de baja tensión (L 220 V): 0.0668 mH
- Resistencia magnética (R_m): 806.67 Ohm
- Inductancia de magnetización (L_m): 427 mH
- Potencia de pérdida en vacío (P_o): 60 W
- Corriente de vacío (I_o): 2 %
- Frecuencia de operación: 60 Hz

3.13. Estructura del modelo en ATP-Draw

El modelo implementado consta de los siguientes elementos:

- Fuente de alimentación monofásica de 220 V rms a 60 Hz, con ángulo de fase inicial de 0° .
- Interruptor de energización (SW), utilizado para estudiar los efectos transitorios al momento de conexión.
- Modelo del transformador con núcleo saturable, que representa tanto el devanado primario (P) de 220 V como el secundario (S) de 2400 V.

- Resistencia de carga de 384 Ohm conectada al secundario para simular condiciones nominales de operación.

El núcleo magnético fue modelado considerando láminas de acero-silicio con grano orientado (tipo E-005), espesor de 0.30 mm, y curva de magnetización no lineal incorporada en el bloque del transformador. Este enfoque permite simular efectos reales como la saturación magnética y el flujo de $\Phi_{\text{pico}} = 0.82 \text{ Wb}$.

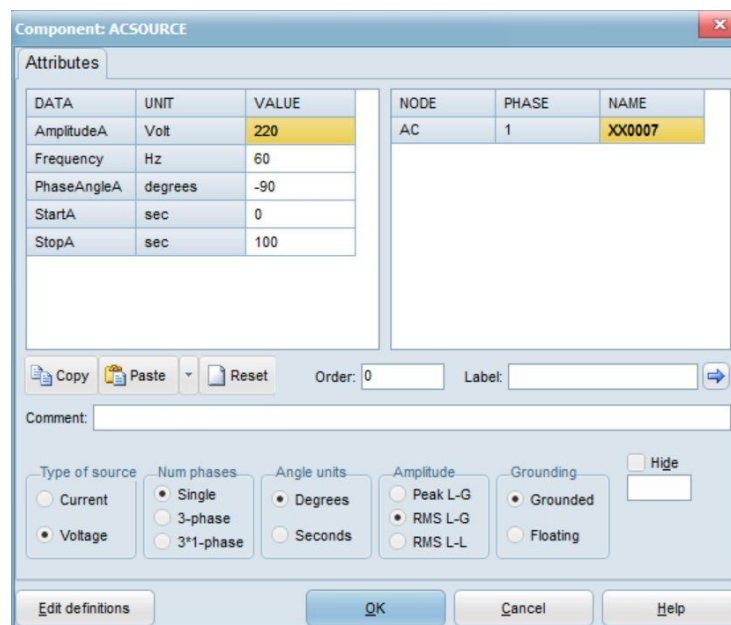


Ilustración 29. Ventana de parámetros de una fuente de voltaje
Fuente: Simulación interfaz de ATP-DRAW

En la figura se representa una fuente de voltaje alterno monofásica. Esta fuente está parametrizada para generar una señal con una amplitud pico de 220 voltios, lo que corresponde a un valor eficaz aproximado de 155,56 V en caso de ser una onda senoidal pura. La frecuencia de operación es de 60 Hz, lo cual es estándar en países en la mayoría de América.

El ángulo de fase inicial está definido como -90 grados, lo que significa que la onda senoidal comenzará desplazada negativamente respecto al eje de referencia. La fuente se encuentra activa desde el segundo 0 hasta el segundo 100 de la simulación.

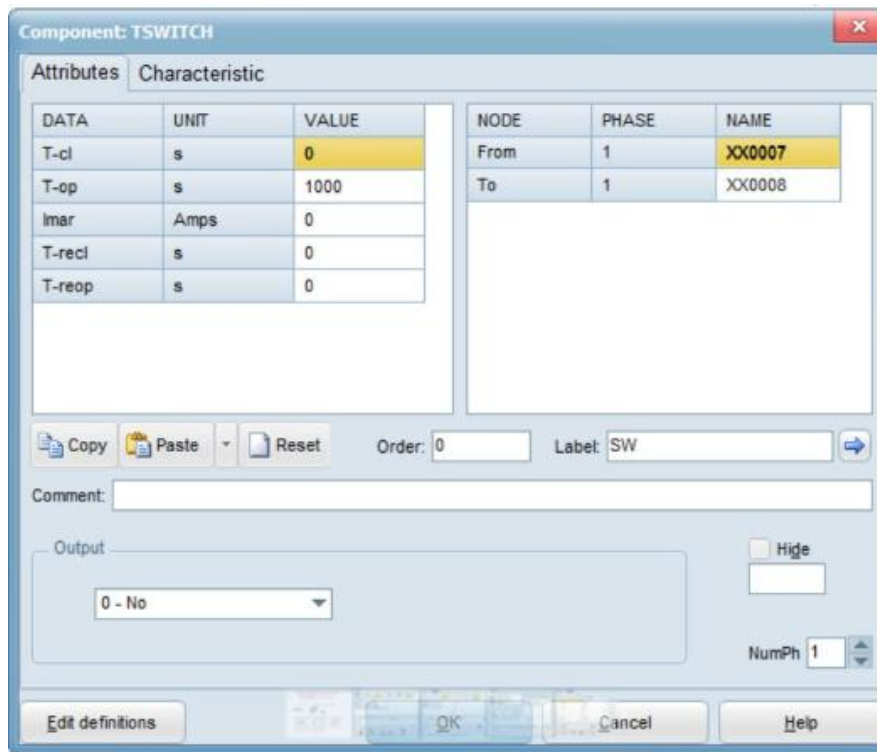


Ilustración 30. Ventana de parámetros switch
Fuente: Simulación interfaz de ATP-DRAW

En la figura se presenta la configuración del componente TSWITCH, el cual representa un interruptor conmutador en una simulación eléctrica. Este componente es utilizado para controlar el flujo de corriente entre dos nodos dentro del circuito en función del tiempo.

El interruptor está configurado para cerrarse en el tiempo $T-cl = 0$ segundos, lo que significa que conecta los nodos desde el inicio de la simulación. Asimismo, se ha definido que se abra en $T-op = 1000$ segundos, lo cual indica que permanecerá cerrado durante toda la simulación si esta dura menos de 1000 segundos.

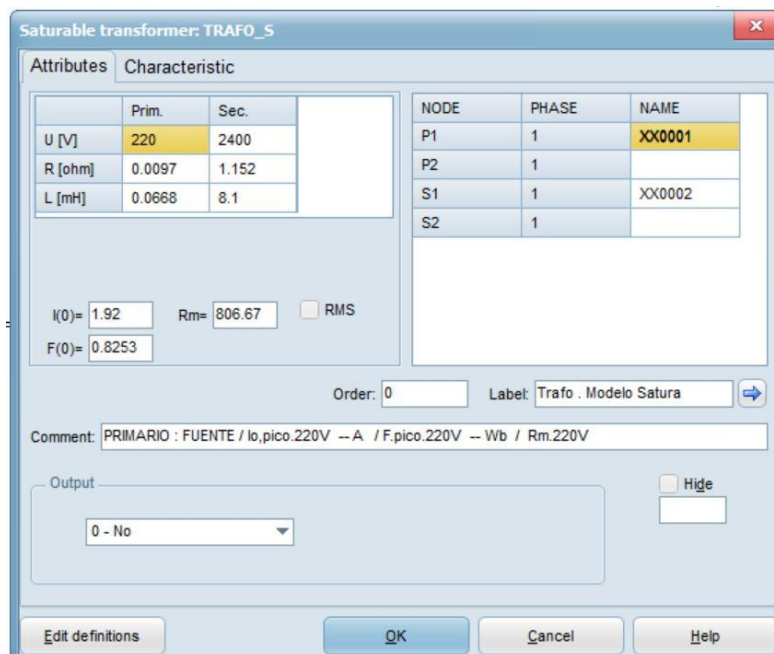


Ilustración 31. Ventana de atributos del transformador
Fuente: Simulación interfaz de ATP-DRAW

En la figura se muestra la configuración de un transformador saturable monofásico denominado como TRAF0, utilizado en simulaciones eléctricas para modelar fenómenos de saturación magnética en el núcleo del transformador. Este tipo de modelo es útil para analizar el comportamiento no lineal del transformador bajo condiciones reales.

Datos eléctricos del transformador

El transformador cuenta con las siguientes especificaciones:

- Tensión primaria (U prim): 220 V
- Tensión secundaria (U sec): 2400 V

Resistencias de los devanados (R):

- Primario: 0.0097 ohmios
- Secundario: 1.152 ohmios

Inductancias de los devanados (L):

- Primario: 0.0668 mH

➤ Secundario: 8.1 mH

Estas resistencias e inductancias representan los parámetros serie del transformador, y son claves para calcular las pérdidas en cobre y las características de transitorio.

Parámetros de saturación

Se incluyen también tres parámetros fundamentales para modelar la saturación:

$I(0) = 1.92 \text{ A}$ → corriente de magnetización en el instante inicial.

$F(0) = 0.8253$ → factor de saturación.

$R_m = 806.67 \text{ ohmios}$ → resistencia de magnetización del núcleo.

Estos valores son esenciales para capturar el comportamiento no lineal del transformador, especialmente cuando se simulan eventos como la energización en vacío o la presencia de armónicos.

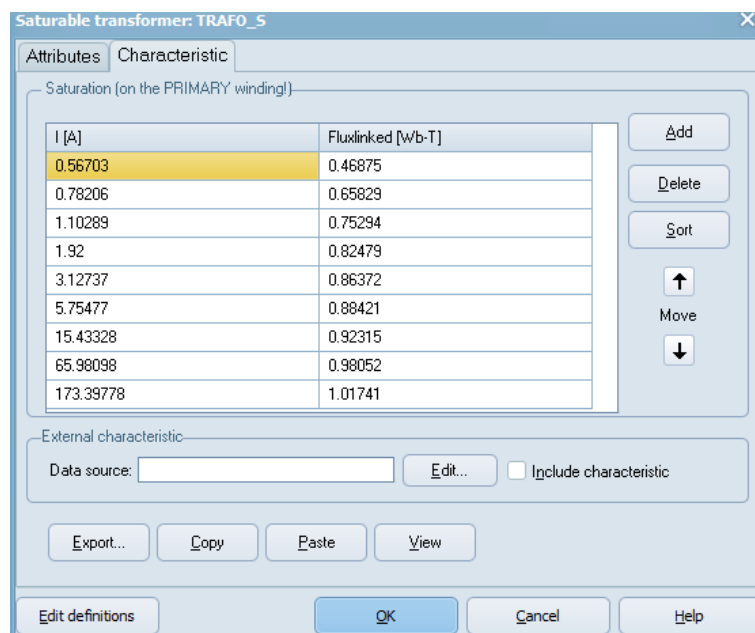


Ilustración 32. Ventana de características del transformador
Fuente: Simulación interfaz de ATP-DRAW

En esta tabla se presentan valores representativos obtenidos directamente de la curva de saturación magnética del devanado primario del transformador. A diferencia de la primera tabla, que mostraba una mayor cantidad de puntos con incrementos pequeños y detallados, en este caso se han seleccionado valores clave que reflejan con mayor claridad la tendencia general del comportamiento magnético.

Se observa que a medida que la corriente aumenta, el flujo magnético también lo hace, pero con una tasa de crecimiento decreciente. Esta tabla destaca los puntos de inflexión más relevantes, permitiendo visualizar claramente el acercamiento a la zona de saturación, especialmente a partir de los 65 A, donde el flujo se estabiliza cerca de su valor máximo, en torno a 1.017 Wb-T.

3.14. Curvas de Saturación

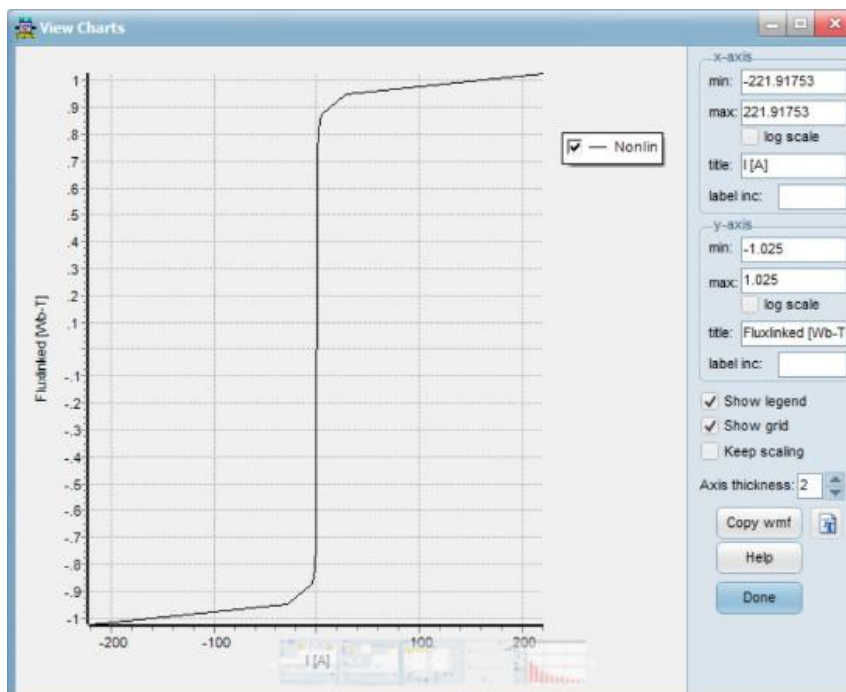


Ilustración 33. Curva de saturación
Fuente: Simulación interfaz de ATP-DRAW

En la figura se muestra la curva de saturación magnética del núcleo del transformador, la cual representa la relación no lineal entre la corriente de magnetización (I) en el eje horizontal (x) y el flujo magnético enlazado (Wb-T) en el eje vertical (y). Esta curva es

fundamental para el modelo de transformador saturable, ya que permite simular con mayor realismo el comportamiento del núcleo bajo distintas condiciones de operación.

4. Capítulo IV: Modelado del panel solar

4.1. Panel fotovoltaico para la alimentación de un transformador monofásico

Para este estudio se ha seleccionado un panel de 500 W como unidad base, y a partir de esta capacidad se determinará la cantidad de módulos requeridos, así como la configuración eléctrica del sistema.


<p>Marca: Trina-solar</p> <p>Tipo: monocristalino</p> <p>Voltaje de circuito abierto: 51.7V</p> <p>Tensión en máxima potencia: 42.8V</p> <p>Corriente máxima de potencia: 11.69A</p> <p>Corriente de corto circuito: 12.28A</p> <p>Dimensiones: 2187mm x 1102mm x 35mm</p> <p>Numero de celdas: 150 celdas.</p>	
---	---

Tabla 2. Especificaciones del panel
Fuente: Ficha técnica del módulo monofacial Vertex 500 Wp

Este montaje busca garantizar un suministro eléctrico confiable y sostenible, utilizando energía solar para la energización del transformador, y evaluando su viabilidad técnica en función de la irradiación solar disponible, la eficiencia de los componentes y las condiciones específicas del sitio de instalación.

4.2. Ecuación del modelo del panel

La ecuación mostrada es el modelo de un panel solar de una sola celda con una resistencia en serie y una resistencia en derivación. Este modelo se conoce como el modelo de un diodo con resistencias parásitas, y representa el comportamiento eléctrico de una celda solar real. La ecuación es:

$$I(v) = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{q(V+R_s)}{n \times K \times T}} - 1 \right] - \frac{V + I \times R_s}{R_{sh}}$$

Explicación de cada término:

I(V): Corriente de salida del panel solar para un voltaje V.

I_{ph}: Corriente generada por la luz. Es proporcional a la irradiancia solar y depende también de la temperatura.

I₀: Corriente de saturación del diodo. Representa las pérdidas por recombinación de portadores en el diodo. Es muy pequeña y depende de la temperatura.

q: Carga del electrón (1.602×10^{-19} C).

K: Constante de Boltzmann (1.381×10^{-23} J/K).

T: Temperatura en kelvin.

n: Factor de idealidad del diodo (usualmente entre 1 y 2).

R_s: Resistencia en serie. Representa las pérdidas internas por conducción en los materiales del panel.

R_{sh}: Resistencia en derivación, que modela las fugas de corriente dentro de la celda. Si R_{sh} es muy alto, esta pérdida es despreciable.

Ecuación simplificada

$$I(V) = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{q \times V}{n \times k \times T}} - 1 \right]$$

Esta es una forma reducida de la ecuación original, sin incluir resistencias en serie ni en derivación.

Nuevamente en esta parte se reducirá más la ecuación simplificada como la expresión exponencial

$$\alpha = \frac{q}{n \times K \times t}$$

Esto se hace para simplificar la expresión exponencial, ya que esa combinación de constantes aparece siempre junta en la fórmula.

Sustituyendo α en la ecuación original:

$$I(V) = I_{ph} - I_0 [e^{\alpha \times V} - 1]$$

Esta forma ya es más compacta, y se utiliza comúnmente en análisis o simulaciones numéricas.

En el modelo más simplificado (solo para efectos aproximados), se puede suponer que la corriente generada por la luz I_{ph} es aproximadamente igual a la corriente de cortocircuito del panel, es decir:

$$I_{ph} \approx I_{cc}$$

Reescribiendo la ecuación final sería:

$$I(V) = I_{cc} - I_{sat} (e^{\alpha \times V} - 1)$$

Aquí se cambia la notación de I_0 (corriente de saturación del diodo) a I_{sat} , que es lo mismo, pero a veces se usa esa notación para claridad.

4.3. Ecuación basada en los datos del catálogo del panel solar

Según el catálogo del panel fotovoltaico, se tienen los siguientes parámetros eléctricos:

Corriente de cortocircuito:

$$I_{sc} = I_{ph} = 12.28 \text{ A}$$

Corriente de saturación del diodo:

$$I_0 = I_{sat} = 1.5 \times 10^{-10} \text{ A}$$

Temperatura de operación:

$$T = 298 \text{ K (equivalente a } 25^\circ\text{C)}$$

Factor de idealidad del diodo:

$$n = 1.2$$

Entonces podemos decir que:

$$\alpha_{celdas} = \frac{1.602 \times 10^{-19}}{1.2 \times 1.381 \times 10^{-23} \times 298} \approx 32.45$$

Se empleó un valor de $\alpha_{celdas} = 32.42$, correspondiente a una celda tipo bajo condiciones estándar. A partir de la ficha técnica del fabricante, se verificó que el panel compuesto por $N_{celdas} = 150$ celdas en serie. Sustituyendo estos valores en la ecuación, se obtiene:

$$\alpha_{panel} = \frac{32.45}{150} = 0.2161$$

Entonces:

$$I(V) = I_{cc} - I_{sat} (e^{\alpha \times V} - 1)$$

Con la ecuación de la corriente para un panel fotovoltaico cuando el voltaje es de 5 V con el valor de $\alpha = 0.2161$

$$I(5) = 12.28 - 1.5 \times 10^{-10} (e^{0.2161 \times 5} - 1)$$

$$I(5) = 12.28 - 1.5 \times 10^{-10} (e^{1.0805} - 1)$$

$$I(5) = 12.28 - 1.5 \times 10^{-10} (2.945 - 1)$$

$$I(5) = 12.28A$$

Se evalúa que la ecuación característica de la corriente del panel fotovoltaico para una tensión de salida de 5 V, considerando los parámetros previamente establecidos: corriente fotogenerada es $I_{ph} = 12.28$ A, corriente de saturación inversa $I_o = 1.5 \times 10^{-10}$ A, y el parámetro $\alpha = 0.2161$. El resultado obtenido es:

$$I(5) = 12.28A$$

4.4. Ecuación del panel tensión máxima potencia 42.8V

$$I(42.8V) = 12.28 - 1.5 \times 10^{-10} (e^{0.2161 \times 42.8} - 1)$$

$$(e^{0.2161 \times 42.8} - 1) = 10400.67$$

$$A = 10400.67$$

$$M = 1.5 \times 10^{-10}$$

$$I(42.8V) = 11.69$$

Entonces:

$$11.69 = 12.28 - M [A]$$

$$+M = \frac{12.28 - 11.69}{[A]} = \frac{0.59}{[A]}$$

$$+M = \frac{0.59}{10400.67}$$

$$+M = 5.67 \times 10^{-5}$$

Remplazando la ecuación del valor +M:

$$I_0 = I_{\text{sat}} = 5.67 \times 10^{-5}$$

$$I(42.8V) = 12.28 - 5.67 \times 10^{-5}(e^{0.2161 \times 42.8} - 1)$$

$$I(42.8) = 12.27A \approx 11.69A$$

Al evaluar la ecuación de corriente del panel a un voltaje de salida de 42.8 V, se obtiene un valor teórico de $I(42.8) \approx 11.69A$. Comparando con la corriente fotogenerada máxima $I_{\text{ph}} = 12.27A$ se evidencia una reducción de $\Delta I = 0.59A$, atribuible al efecto del término exponencial que modela la recombinación interna y la resistencia de carga. Esta diferencia corresponde a una variación relativa aproximada del 4.8 %, la cual se encuentra dentro de rangos esperados para voltajes cercanos al punto de máxima potencia del panel.

4.5. Ecuación del panel tensión de circuito abierto 51.7V

Para mejorar la precisión del modelo eléctrico del panel fotovoltaico, se plantea una condición de frontera evaluando el punto donde $I(V)=0$, es decir, el voltaje de circuito abierto. Se parte nuevamente del modelo simplificado:

$$I(V) = I_{cc} - M^*(e^{\alpha \times V} - 1)$$

En el punto de circuito abierto $V=V_{oc}$, se cumple que $I=0$, por lo tanto:

$$0 = I_{cc} - M^*(e^{\alpha \times V} - 1)$$

$$M^*(e^{\alpha \times V} - 1) = I_{cc}$$

$$M^* = \frac{I_{cc}}{e^{\alpha \times V} - 1}$$

Sustitución de los valores

$$M^* = \frac{12.28}{e^{0.2161 \times 51.7} - 1}$$

$$M^* = \frac{12.28}{70944.25} = 1.73 \times 10^{-4}$$

Este nuevo valor ajustado M^* representa una estimación más realista del parámetro de recombinación inversa para el panel completo, considerando su comportamiento en el extremo de voltaje abierto.

Para obtener un valor más estable de este parámetro, se propone un promedio entre el valor original usado y el valor ajustado experimentalmente:

$$M_{\text{promedio}} = \frac{M + M^*}{2} = \frac{5.67 \times 10^{-5} + 1.73 \times 10^{-4}}{2} = 1.14 \times 10^{-4}$$

Este procedimiento permite refinar el valor de la corriente de saturación inversa I_0 , mediante la evaluación directa del modelo en el punto de circuito abierto. El valor ajustado de $M_{\text{promedio}} = 1.14 \times 10^{-4}$ permite representar con mayor fidelidad el comportamiento del panel, especialmente en condiciones de alta tensión.

Una vez obtenido el valor promedio de la corriente de saturación ajustada M_{prom} , se evalúan dos puntos fundamentales de la curva $I-V$ del panel fotovoltaico, a fin de verificar la precisión del modelo propuesto frente a la placa del fabricante y la realidad operativa.

4.5.1. Corriente a voltaje de circuito Abierto (42.8 V)

$$I(42.8V) = 12.28 - 1.14 \times 10^{-4} (e^{0.2161 \times 42.8} - 1)$$

$$\alpha \times V = e^{0.2161 \times 42.8} = 10400.67$$

$$I(42.8V) = 12.28 - 1.14 \times 10^{-4} \times (10400.67 - 1)$$

$$I(42.8V) = 11.09A$$

Este valor concuerda con el punto de operación típico del panel y está muy próximo al valor de 11.69 A según el catálogo.

4.5.2. Corriente a voltaje de circuito abierto (51.7 V)

$$I(51.7V) = 12.28 - 1.14 \times 10^{-4} \times (e^{0.2161 \times 51.7} - 1)$$

$$\alpha \times V = e^{0.2161 \times 51.7} = 70944.25$$

$$I(51.7V) = 12.28 - 1.14 \times 10^{-4} \times (70944.25 - 1)$$

$$I(51.7V) = 4.19A \approx 0 A$$

4.6. Cálculo simultáneo de M mediante de ecuaciones del modelo fotovoltaico

Con el fin de obtener un valor más representativo del parámetro M para el modelo de corriente de un panel fotovoltaico, se considera un sistema de dos ecuaciones basado en puntos conocidos de la curva I-V. La expresión general del modelo es:

$$I(V) = I_{cc} - M * (e^{\alpha \times V} - 1)$$

Punto 1: V=42.8 V

$$I(42.8V) = 12.28 - M \times (10400.67 - 1)$$

Punto 2: V=51.7 V

$$I = 0 = 12.28 - M \times (70944.25)$$

Estas dos ecuaciones se suman:

$$(11.69 + 0) = (12.28 + 12.28) - M \times (10400.67 + 70944.25)$$

$$11.69 = 24.56 - M \times 81344.92$$

$$M = \frac{12.87}{81344.92} = 1.58 \times 10^{-4}$$

Este valor representa una mejor estimación promedio ponderada, ya que se basa directamente en dos condiciones reales del panel: un punto de operación máxima potencia y el voltaje de circuito abierto. Esto mejora la estabilidad del modelo frente a errores de redondeo o incertidumbre en mediciones individuales.

Luego de obtener el valor refinado de M mediante sistema de ecuaciones simultáneas, se procede a su validación utilizando dos puntos clave de operación:

4.6.1. Evaluación a 42.8 V

$$I(42.8) = 12.28 - 1.58 \times 10^{-4} \times 10400.67$$

$$I(42.8) = 10.64A$$

Comparación esperada: el valor de la placa era 11.69 A, por lo que la diferencia es:

$$\Delta I = 11.69 - 10.64 = 1.05A$$

Un error relativo de 9%

4.6.2. Evaluación a 51.7 V

$$I(51.7V) = 12.28 - 1.58 \times 10^{-4} \times 70944.25$$

$$I(51.7V) = 1.07A$$

Idealmente, la corriente debería acercarse a 0 A porque es el punto de circuito abierto, pero aquí el modelo aún predice 1.07 A.

Estos resultados demuestran que el modelo representa adecuadamente la tendencia del comportamiento eléctrico del panel, con errores relativos aceptables para fines de simulación preliminar. Se concluye que el modelo está suficientemente calibrado para continuar con análisis de potencia máxima, dimensionamiento y comparación con curvas experimentales o de fabricante.

4.7. Curva I-V modelado en ATP- DRAW

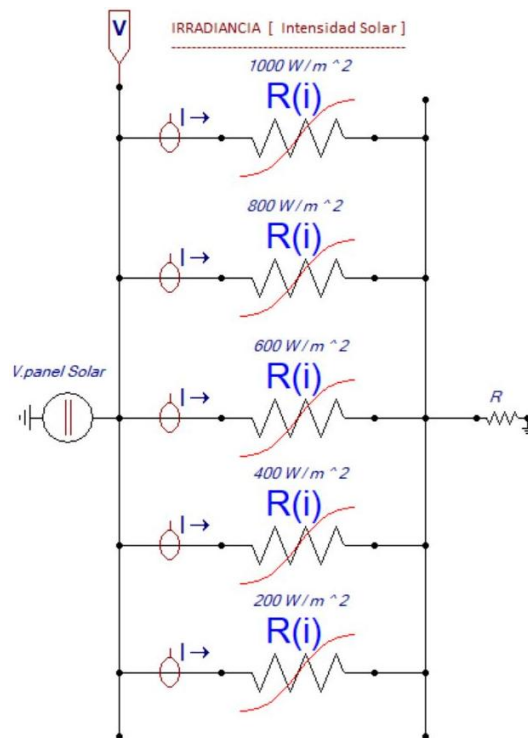


Ilustración 34. Modelado de la intensidad solar
Fuente: adaptación propia del autor

Característica:

Tipo: Monocristalino

N° de celdas: 150

Voc (voltaje en circuito abierto): 51.7 V

V_{mpp} (voltaje en punto de máxima potencia): 42.8 V

P_{max}: 500 W pico

I_{sc}: 12.28 A

I_{mpp}: 11.69 A

En el modelo de simulación de la irradiancia solar variable aplicada a un panel solar en el entorno de ATP-DRAW. Este esquema representa de forma clara cómo se implementa la respuesta del panel solar frente a distintos niveles de irradiación solar, usando una estructura en paralelo.

Cada rama del circuito incluye:

- Un controlador de corriente dependiente del voltaje del panel.
- Una resistencia no lineal $R(i)$, que representa el comportamiento de carga bajo condiciones reales.
- Un bloque asociado a un valor específico de irradiancia solar, desde 1000 W/m² (condición estándar) hasta 200 W/m² (irradiancia baja).

Estas ramas están conectadas en paralelo para simular dinámicamente el comportamiento del panel fotovoltaico frente a diferentes condiciones de luminosidad. La tensión de salida del panel $V_{\text{panel solar}}$ alimenta este arreglo, y finalmente, la corriente total se entrega a una resistencia de carga R que representa el consumo conectado.

El modelo permite observar la relación directa entre la irradiancia y la corriente generada, ya que, a mayor irradiancia, mayor será la corriente que fluye a través de la rama correspondiente. Las resistencias no lineales $R(i)$ permiten capturar la curva característica I-V del panel, haciendo que la simulación sea más realista que un modelo puramente ideal.

4.8. Configuración en ATP-DRAW

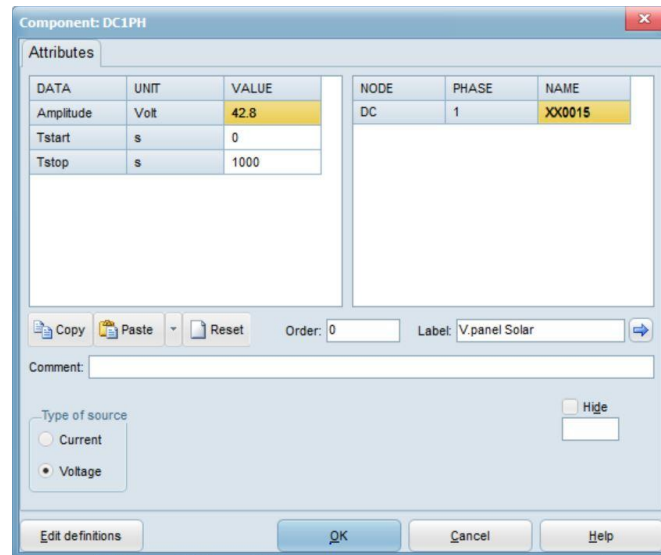


Ilustración 35. Ventana de parámetro de fuente de voltaje DC
Fuente: Simulación interfaz de ATP-DRAW

Se muestra la configuración del componente DC1PH dentro del entorno de simulación ATP-DRAW, el cual representa una fuente de voltaje continuo (DC). Este componente ha sido utilizado para modelar el voltaje de salida de un panel solar fotovoltaico con condiciones controladas.

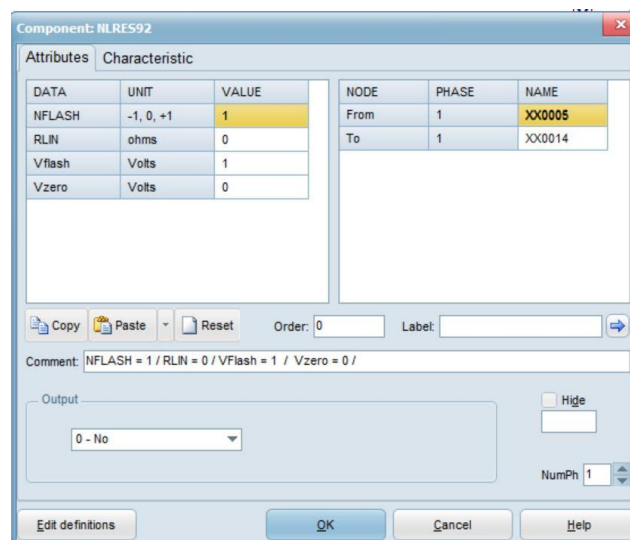


Ilustración 36. Ventana de parámetro resistencia no lineal
Fuente: Simulación interfaz de ATP-DRAW

La configuración del componente NLRES, que representa una resistencia no lineal controlada en el entorno de simulación ATP-DRAW. Este componente permite modelar

resistencias cuya respuesta varía en función del voltaje, siendo útil en simulaciones de paneles solares, varistores, limitadores de tensión y cargas complejas.

Parámetros configurados:

- $NFLASH = 1$ Este parámetro define el tipo de comportamiento de la resistencia. En este caso, un valor de 1 indica que se usará una resistencia no lineal estándar con pendiente definida por el valor de RLN , y activada por el nivel de voltaje.
- $RLN = 0$ ohmios Este valor representa la pendiente de la resistencia en el punto definido por $Vflash$. Un valor de 0 indica que, en esta configuración específica, no se ha definido aún una curva activa o que se está utilizando como un interruptor ideal sin caída de tensión.
- $Vflash = 0$ V Es el nivel de voltaje en el cual la resistencia cambia de estado. En este caso, al estar en cero, el cambio de comportamiento se produce al cruce por cero del voltaje, funcionando como un disparador.
- $Vzero = 0$ V Define el punto base para linealidad. En este caso, también fijado en cero para que toda la caracterización ocurra simétricamente alrededor del origen.

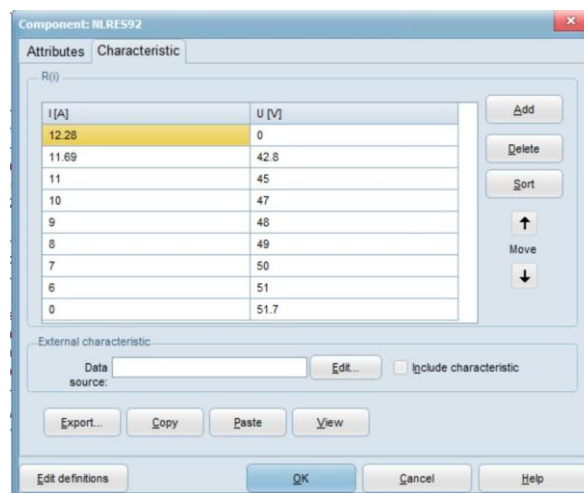


Ilustración 37. Ventana de característica de la resistencia no lineal
Fuente: Simulación interfaz de ATP-DRAW

La configuración del componente NLRES92, que permite definir una resistencia no lineal dependiente de la corriente $R(i)$ en el entorno ATP-DRAW. Este modelo ha sido

configurado para emular de forma precisa el comportamiento eléctrico de un panel solar, introduciendo una tabla de datos personalizada que relaciona corriente (I) y voltaje (U) de salida del panel.

Estos valores fueron tomados del datasheet del panel monocristalino, donde:

- $I_{sc} = 12.28 \text{ A}$ (corriente de cortocircuito)
- $V_{mpp} = 42.8 \text{ V}$ a 11.69 A (punto de máxima potencia)
- $V_{oc} = 51.7 \text{ V}$ (voltaje en circuito abierto)

Este modelado permite representar con gran realismo el comportamiento no lineal y dependiente de irradiancia del panel, siendo útil en análisis de potencia, eficiencia, seguimiento del punto de máxima potencia y diseño de convertidores DC/DC.

4.9. Curva I-V en 1000W/m^2 en ATP



Ilustración 38. Curva de 1000W/m^2
Fuente: Simulación view de ATP-DRAW

Se presenta la curva I-V del panel solar bajo condiciones estándar de irradiancia de 1000 W/m^2 , correspondiente a condiciones de máxima generación según la norma STC (Standard Test Conditions). Esta curva ha sido generada a partir del componente NLRES

en ATP-DRAW, mediante la tabla característica que define los puntos clave del comportamiento eléctrico del panel.

4.10. Curva I-V de 800W/m² en ATP-DRAW



Ilustración 39. Curva de 800W/m²
Fuente: Simulación view de ATP-DRAW

Se muestra la curva característica I-V del panel solar bajo una irradiancia de 800 W/m², modelada en el entorno ATP-DRAW. Esta gráfica representa el comportamiento del módulo fotovoltaico en condiciones de radiación solar moderadamente alta, típicas de un día parcialmente nublado o con inclinación desfavorable del panel.

Comportamiento observado:

- La corriente máxima (Isc) ha disminuido respecto a la condición de 1000 W/m², siendo ahora cercana a 9 A.
- El voltaje en circuito abierto (Voc) se mantiene casi constante, alrededor de 51.7 V, lo cual es consistente con la teoría fotovoltaica, donde el voltaje depende poco de la irradiancia.

- El punto de máxima potencia (V_{mpp}) se encuentra en torno a los 8 A y 42.8 V, lo que representa una disminución del producto $V \cdot I$ y, por tanto, de la potencia entregada.

4.11. Curva I-V de 600W/m^2 en ATP

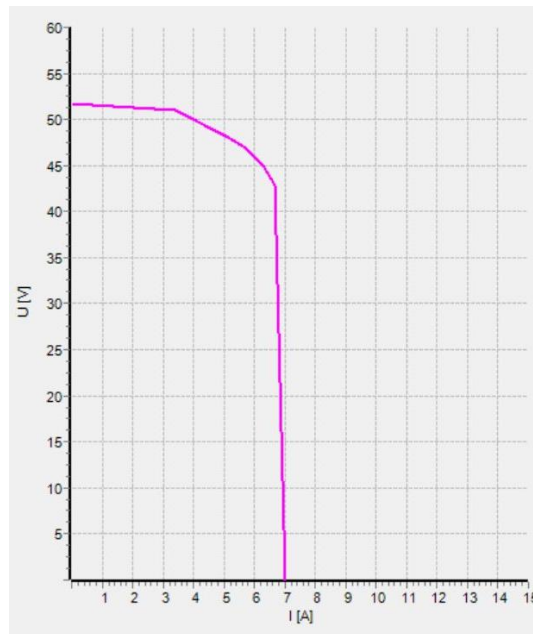


Ilustración 40. Curva de 600W/m^2
Fuente: Simulación view de ATP-DRAW

En esta condición de simulación se analiza la curva característica corriente-voltaje (I-V) del panel solar operando bajo una irradiancia de 600 W/m^2 . Como es de esperarse, la corriente generada disminuye proporcionalmente con respecto a niveles más altos de irradiancia, mientras que el voltaje se mantiene prácticamente constante. La corriente de cortocircuito en este caso es de aproximadamente 7.4 amperios, y el voltaje en circuito abierto se mantiene en torno a 51.7 voltios. El punto de máxima potencia se sitúa cerca de 6.8 amperios y 42.8 voltios, lo que implica que el panel entrega cerca del 60 % de su potencia nominal bajo condiciones estándar.

La curva conserva la forma típica de una fuente fotovoltaica: una región inicial donde la corriente se mantiene constante mientras el voltaje aumenta lentamente, seguida de una zona de caída abrupta donde un pequeño aumento en el voltaje provoca una rápida disminución de la corriente. Este comportamiento evidencia cómo el rendimiento del

panel se ve afectado directamente por la intensidad de la radiación solar incidente, manteniéndose el voltaje prácticamente estable mientras la corriente disminuye conforme se reduce la irradiancia. Esta simulación es clave para estudiar el impacto de condiciones atmosféricas variables sobre la eficiencia del sistema fotovoltaico.

Parámetros de la fuente DC

- Con una amplitud 42.8 V Este valor corresponde al voltaje en el punto de máxima potencia (V_{mpp}) del panel solar, según las especificaciones técnicas del modelo monocristalino utilizado. Esta elección permite simular la operación del panel bajo condiciones óptimas de irradiancia.
- El $T_{start} = 0$ La fuente se activa desde el inicio de la simulación.
- El $T_{stop} = 1000$ s La fuente permanece activa durante todo el tiempo simulado, lo que permite analizar el comportamiento del sistema a largo plazo si es necesario.
- Se ha seleccionado la opción de fuente de voltaje (y no de corriente), coherente con el comportamiento real de un panel solar que entrega voltaje constante cuando está en modo de operación bajo carga estable.

4.12. Curva I-V de 400W/m² en ATP

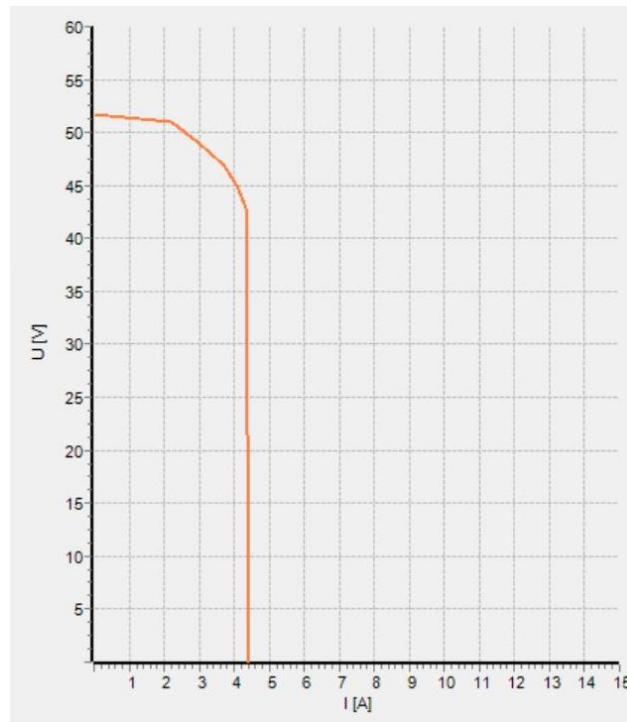


Ilustración 41. Curva de 400W/m²
Fuente: Simulación interfaz de ATP-DRAW

La curva I-V del panel solar bajo una irradiancia de 400 W/m², en esta condición, la corriente generada por el panel disminuye de forma proporcional respecto a niveles de irradiancia más altos, mientras que el voltaje en circuito abierto se mantiene prácticamente constante. La corriente de cortocircuito se reduce a aproximadamente 4.9 amperios, y el punto de máxima potencia se encuentra cerca de los 4.5 amperios y 42.8 voltios, lo que refleja una caída significativa en la potencia generada con respecto a las condiciones estándar de 1000 W/m².

4.13. Curva I-V de 200W/m² en ATP

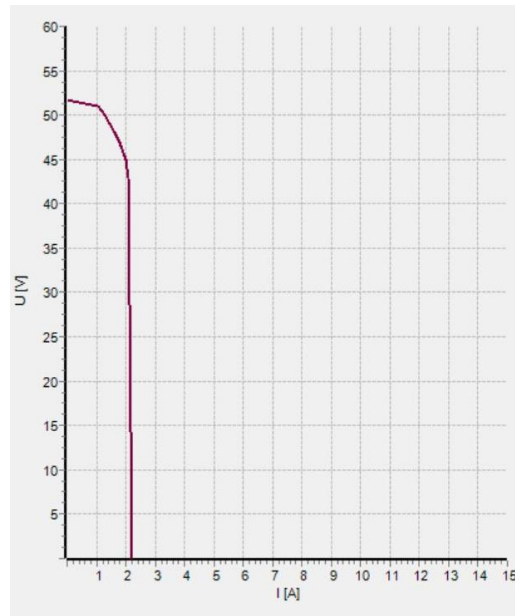


Ilustración 42. Curva de 200W/m²
Fuente: Simulación view de ATP-DRAW

La curva I-V presentada corresponde al comportamiento del panel solar bajo una irradiancia de 200 W/m², simulada en ATP-DRAW mediante una resistencia no lineal que modela fielmente la respuesta eléctrica del módulo fotovoltaico. En este caso, la corriente de salida disminuye de forma considerable, ubicándose en torno a los 2.4A en cortocircuito. A pesar de esta reducción significativa en corriente, el voltaje en circuito abierto permanece estable alrededor de los 51.7V, lo cual es característico de los módulos solares, donde el voltaje depende principalmente de la temperatura y no de la irradiancia.

El punto de máxima potencia en estas condiciones se sitúa en aproximadamente 2.1A y 42.8V, lo que indica que el panel entrega menos del 20 % de su potencia nominal. La forma de la curva se conserva, mostrando una zona de corriente casi constante al inicio y una caída abrupta a medida que se alcanza el voltaje máximo. Esta condición refleja el comportamiento del panel en situaciones de radiación solar muy baja, como al amanecer, en días nublados intensos o en ubicaciones con sombra parcial.

5. CAPITULO V: SISTEMA FOTOVOLTAICO

5.1. Diagrama de bloque

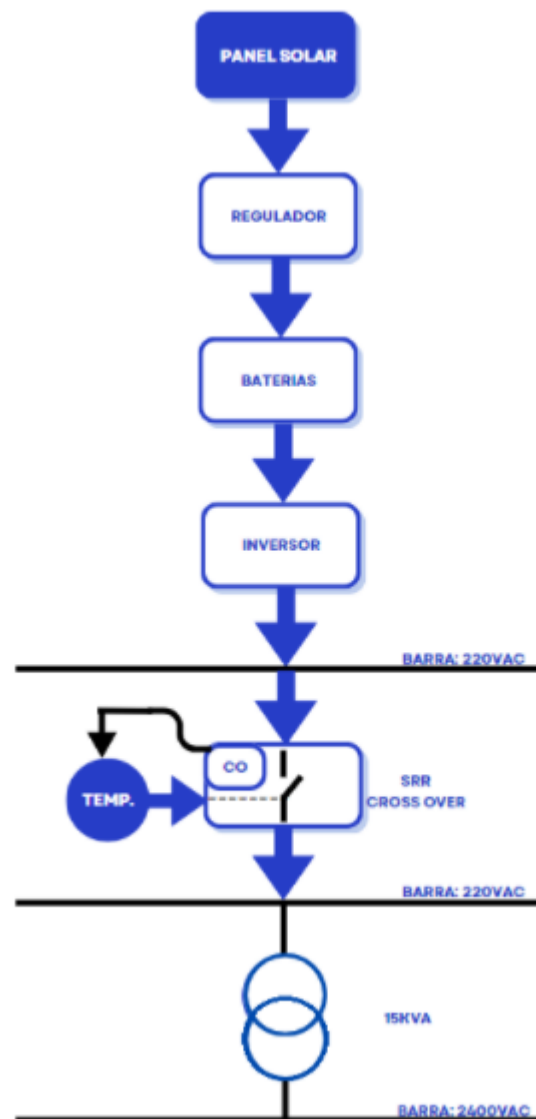


Ilustración 43. Diagrama de bloque del sistema fotovoltaico
Fuente: Elaboración propia, diseño de flujo del sistema fotovoltaico.

El presente diagrama de bloques representa la arquitectura funcional de un sistema fotovoltaico diseñado para alimentar un transformador de 15 kVA a través de una barra de distribución de 220 VAC. A continuación, se detalla el flujo de energía y control del sistema:

- **Panel Solar:** Es la fuente principal de generación de energía eléctrica. Está conformado por módulos fotovoltaicos que convierten la radiación solar en energía de corriente continua (DC).

- **Regulador de Carga:** Regula la tensión y corriente proveniente de los paneles solares antes de que se almacene en el banco de baterías, evitando sobrecargas o descargas profundas.
- **Banco de Baterías:** Acumula la energía generada para asegurar un suministro continuo, incluso en ausencia de radiación solar. La configuración permite operar como sistema de respaldo por al menos un día.
- **Inversor:** Convierte la corriente continua almacenada en las baterías en corriente alterna (AC) a 220 VAC, apta para alimentar cargas o transformadores.
- **Sistema de Control con SSR y Temporizador:** Antes de energizar el transformador, se incluye un relé de estado sólido (SSR) con función Cross over, activado mediante un temporizador de precisión. Este sistema asegura que la energización del transformador ocurra en el momento adecuado, evitando corrientes de irrupción y protegiendo los componentes internos.
- **Transformador de 15 kVA:** Elevador con un voltaje de 220 VAC a 2400 VAC para su posterior distribución o conexión con otros sistemas eléctricos.

5.2. Información Geográfica en PVSYST de la irradiancia fotovoltaica

En este apartado se puede presentar la referencia geográfica fotovoltaica que presenta la parroquia Las Piedras en relación a la irradiancia para el sistema fotovoltaico. A continuación, se presenta la ubicación geográfica de las piedras:

Latitud: 0. 98°

Longitud: -79, 61°

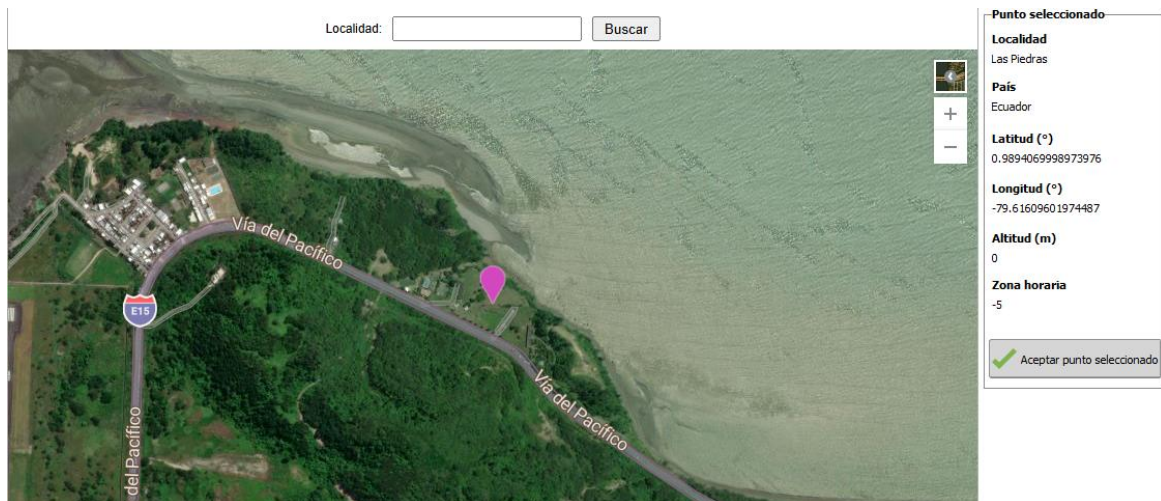


Ilustración 44. Ubicación geográfica de Las Piedras tomada en el software PVSYST
Fuente: Captura generada en PVSYST para selección de sitio (coordenadas geográficas).

5.2.1. Producción estimada mensualmente para el sistema fotovoltaico

La tabla muestra la estimación mensual de irradiación solar y temperatura promedio para la ubicación del sistema fotovoltaico. Se observa que los meses de mayor potencial energético son marzo 5 kWh/m²/día y abril 4.82 kWh/m²/día, mientras que octubre y noviembre presentan los niveles más bajos. En promedio, se cuenta con una irradiancia horizontal global de 4.3 kWh/m²/día, lo que permite considerar la zona como adecuada para la implementación de sistemas solares.

Asimismo, la temperatura promedio anual de 23.9 °C es favorable para los módulos fotovoltaicos, ya que evita pérdidas térmicas significativas, garantizando una buena eficiencia del sistema.

Mes	Irradiación horizontal global (kWh/m ² /día)	Irradiación difusa horizontal (kWh/m ² /día)	Temperatura (°C)
Enero	4,31	2,12	23
Febrero	4,43	2,25	23
Marzo	5	2,31	23,1
Abril	4,82	2,14	23,5
Mayo	4,57	2,06	24,4
Junio	4,01	1,95	24,5
Julio	4,1	2	24,5

Agosto	4,06	2,02	24,5
Septiembre	4,21	2,27	24,5
Octubre	3,89	2,1	23,8
Noviembre	3,84	2,11	23,2
Diciembre	4,22	2,07	23,1
Año	4,3	2,14	23,9

Tabla 3. Irradiación solar
Fuente: PVSYST datos meteorológico NASE-SSE

5.2.2. Gráfico de columnas de la irradiación global

La gráfica de columnas muestra el promedio mensual de irradiación horizontal global en el sitio de instalación del sistema fotovoltaico. Se observa una variabilidad estacional moderada, con valores que oscilan entre 3.84 kWh/m²/día (noviembre) y 5.0 kWh/m²/día (marzo), lo cual representa un entorno favorable para la generación solar durante todo el año. El valor promedio anual de 4.3 kWh/m²/día confirma que la ubicación geográfica del sistema según las coordenadas utilizadas en PVsyst (lat. 0.98°, long. -79.61°) es adecuada para la implementación de energía fotovoltaica.

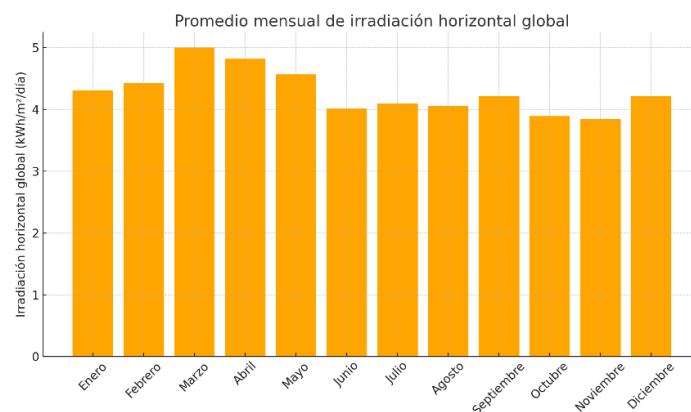


Ilustración 45. Promedio mensual de irradiación
Fuente: Elaboración propia mediante Python

5.2.3. Gráfico de columnas de la irradiación difusa

La gráfica muestra el comportamiento mensual promedio de la irradiación difusa horizontal, expresada en kWh/m²/día. Esta variable representa la porción de radiación solar que llega de manera indirecta a la superficie, es decir, dispersada por nubes, partículas o la atmósfera.

Se observa que los valores se mantienen relativamente estables a lo largo del año, con una irradiancia difusa promedio anual de 2.14 kWh/m²/día, según los datos obtenidos mediante simulaciones en PVsyst. El mes de marzo presenta el mayor valor 2.34 kWh/m²/día, mientras que junio muestra el nivel más bajo 1.95 kWh/m²/día.

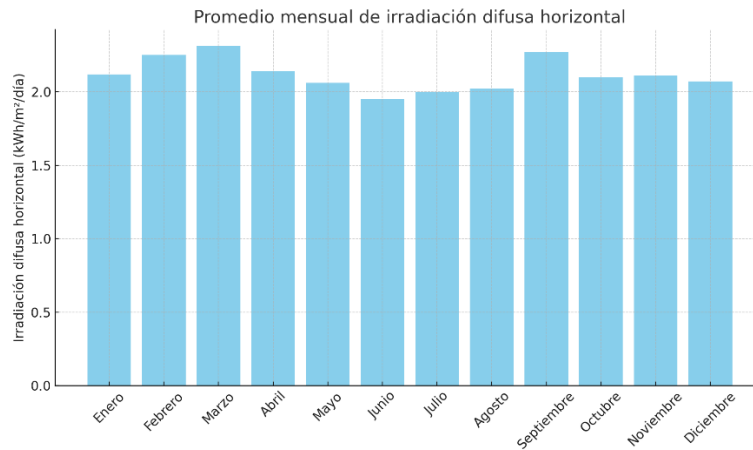


Ilustración 46. Promedio mensual de irradiancia difusa
Fuente: Elaboración propia mediante Python

5.2.4. Inclinación óptima de los paneles fotovoltaicos

Según la simulación realizada en el software PVsyst, se determinó que la mejor inclinación para los paneles solares en el sitio de instalación es de 15.0° respecto a la horizontal. Esta inclinación permite maximizar la captación de radiación solar durante el año, optimizando así la producción energética del sistema.

Esta configuración fue establecida tras analizar diferentes escenarios de inclinación, seleccionando aquella que ofreció el mayor rendimiento energético anual.

Inclinación 15.0°

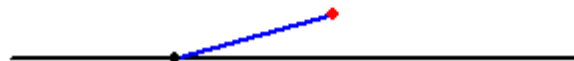


Ilustración 47. Inclinación óptima de los paneles fotovoltaicos PVSYST
Fuente: Captura generada mediante software PVSYST

5.2.5. Optimización de la inclinación y orientación del plano

La simulación anual en PVsyst muestra que la inclinación óptima para los paneles es de 15.0° , obteniéndose un factor de transposición (F_{Tranpos}) de 0.99, lo que indica una excelente captación de radiación en esa posición. La pérdida respecto a la inclinación óptima es de apenas -0.8% , lo cual es despreciable y confirma que la inclinación seleccionada es altamente eficiente.

En cuanto a la orientación del plano, el análisis revela que el sistema es poco sensible a desviaciones, ya que el rendimiento se mantiene prácticamente constante entre -90° y $+90^\circ$. Esto indica que una orientación hacia el norte (en el hemisferio sur) o hacia el sur (en el hemisferio norte) resulta adecuada, dependiendo de la ubicación geográfica del proyecto.

Este comportamiento demuestra que el diseño geométrico del sistema es estable y que las pérdidas por desviaciones angulares son mínimas.

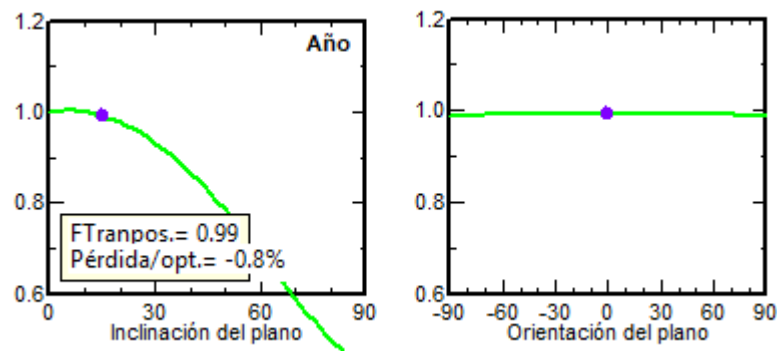


Ilustración 48. Datos óptima de inclinación
Fuente: Captura generada mediante software PVSYST

5.2.6. Gráfico de columnas de la temperatura

El gráfico presenta el comportamiento promedio mensual de la temperatura ambiente en la zona de instalación del sistema fotovoltaico. Los datos muestran una distribución bastante homogénea durante el año, con temperaturas que oscilan entre 23°C y 24.5°C , y un promedio anual de 23.9°C .

Este rango térmico es favorable para el funcionamiento de los módulos fotovoltaicos, ya que evita tanto el sobrecalentamiento como las pérdidas excesivas por temperatura. Si bien el rendimiento de los paneles solares disminuye ligeramente con el aumento de la

temperatura, en este caso no se superan los 25 °C, lo cual asegura condiciones térmicas estables y eficientes para la conversión energética.

Los meses de mayo a septiembre presentan las temperaturas más altas (hasta 24.5 °C), mientras que enero, febrero, noviembre y diciembre muestran valores más bajos (23 °C). Esta variación mínima implica que el sistema mantendrá una producción energética constante a lo largo del año, sin requerir sistemas adicionales de ventilación o disipación térmica.

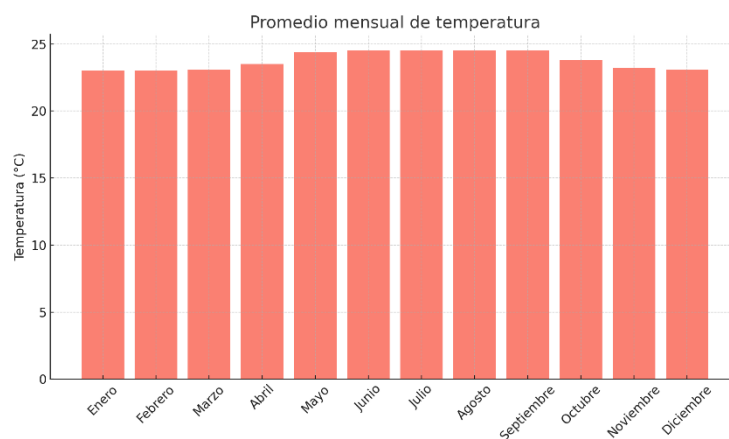


Ilustración 49. Promedio mensual de temperatura
Fuente: Captura generada mediante software PVSYST

5.3. Configuración de los módulos fotovoltaicos

Para este caso se definió la instalación de 36 módulos fotovoltaicos de 500 W, con el propósito de cubrir la demanda energética requerida para la carga del banco de baterías y asegurar el correcto funcionamiento del inversor. Esta configuración también permite alimentar un transformador monofásico.

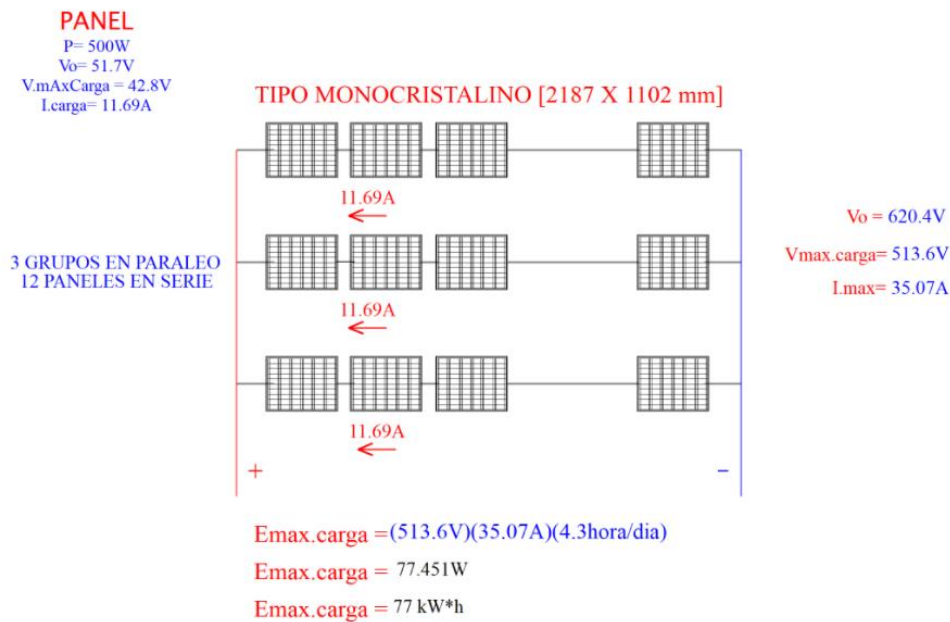


Ilustración 50. Diagrama del grupo de paneles
 Fuente: Elaboración propia en ProfiCAD

Se optó por organizar los módulos en 3 grupos de 12 paneles conectados en serie, lo que permite alcanzar los niveles de tensión adecuados para el banco de baterías. Posteriormente, estos tres grupos se conectan entre sí en paralelo, optimizando así la corriente disponible para el sistema.

Los parámetros eléctricos obtenidos por cada grupo de 12 paneles son:

Voltaje en circuito abierto (Voc):

$$V_{oc} \text{ total: } 12 \times 51.7 V = 620.4 V$$

Voltaje en punto de máxima potencia (Vmp):

$$V_{mp} \text{ total: } 12 \times 42.8 V = 513.6 V$$

Potencia total por grupo:

$$12 \times 500 W = 6,000 W (6 kW)$$

Al realizar la conexión en paralelo de los 3 grupos, se conserva la tensión del sistema en 513.6 V, lo cual es adecuado para alimentar un banco de baterías de 500 V. Además, se suman las corrientes generadas por cada grupo, alcanzando una corriente total de:

$$I_{max} = 11.69A \times 3 = 35.07A$$

Finalmente, la potencia total generada por el sistema fotovoltaico es de:

$$\text{Potencia total} = 3 \times 6 \text{ kW} = 18 \text{ kW}$$

5.4. REGULADOR DE CARGA

5.4.1. Compatibilidad con el banco de baterías

El banco de almacenamiento está compuesto por 10 baterías de litio LiFePO₄ de 50 V nominal y 300 Ah, conectadas en serie, lo cual da como resultado un sistema de 500 VDC nominales. Esta configuración requiere un regulador capaz de manejar salidas de alta tensión DC.


<p>Marca: Zhejiang Bangzhao Electric Co., Ltd.</p> <p>Controlador de carga solar MPPT para sistema de batería solar de alto voltaje.</p> <p>Tensión nominal: 192–500 VDC</p>	
--	---

Tabla 4. Especificaciones del regulador de carga

Fuente: Especificaciones proporcionadas por el proveedor Zhejiang Bangzhao Electric Co., Ltd.

5.4.2. Características del regulador seleccionado

Se seleccionó un regulador de carga tipo MPPT diseñado específicamente para sistemas de alta tensión, con capacidad de operar en un rango de salida de hasta 500 VDC, compatible con el banco de baterías configurado a 500 V nominales. El regulador permite una entrada fotovoltaica de hasta 600 VDC, lo cual lo hace adecuado para recibir la energía de los 36 paneles solares de 500 W, conectados en tres grupos de 12 paneles en serie, con un voltaje de operación de aproximadamente 528 V. Este dispositivo incorpora tecnología de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT), lo que optimiza la captación de energía solar en tiempo real. Además, permite configurar la corriente de carga de acuerdo con la capacidad del banco de baterías (300 Ah) y cuenta con protecciones integradas contra sobrecarga, sobretemperatura y cortocircuito.

5.4.3. Justificación de la elección

La elección de este regulador se basa en su compatibilidad directa con bancos de baterías de alta tensión, lo cual no es posible con reguladores convencionales que trabajan a 12 V, 24 V o 48 V. Su capacidad de operar con voltajes de entrada fotovoltaica elevados lo hace ideal para sistemas con arreglos de paneles en serie, como el presente caso. La incorporación de la tecnología MPPT permite aprovechar al máximo la radiación solar disponible, incrementando la eficiencia del sistema. Adicionalmente, su capacidad de ajuste de parámetros y sus sistemas de protección garantizan una operación segura y prolongada, evitando el deterioro prematuro del banco de baterías. Esta elección asegura una integración efectiva entre el campo fotovoltaico y el sistema de almacenamiento, cumpliendo con los requisitos técnicos del proyecto.

5.4.4. FUNCIONES PRINCIPALES DEL REGULADOR:

- El regulador MPPT convierte y ajusta esa diferencia para maximizar el aprovechamiento de la energía.
- Opera en el punto de máxima potencia para cada momento del día.

Desconexión automática por seguridad

- Si detecta sobrecalentamiento, cortocircuito, voltaje anormal en paneles o batería, desconecta el sistema.
- Actúa como puente inteligente entre los paneles y las baterías.

¿Qué pasa si NO usas un regulador?

Consecuencia:

- Energía no optimizada
- No se regula la carga
- Paneles entregan voltaje directo a baterías

Riesgo:

- Sobrevoltaje, riesgo de explosión o corte BMS
- Baja eficiencia (no MPPT)
- Degradación rápida del banco

5.5. Baterías

En este caso, se ha optado por baterías de ion de litio debido a su alta densidad energética, eficiencia en ciclos de carga/descarga y bajo mantenimiento, características que las hacen más adecuadas frente a tecnologías tradicionales como el plomo-ácido.


<p>Marca: IMPROVE</p> <p>Voltaje: 50V</p> <p>Amperio/Hora: 300Ah</p> <p>Tipo: batería litio</p> <p>Tipo de batería: LiFePO4</p>	
---	--

Tabla 5. Especificaciones de la batería

Fuente: Especificaciones proporcionadas por el proveedor Improve Battery Co., Ltd., 2025.

Para alcanzar una tensión de operación cercana a los 500 V, requerida por el inversor y adecuada para el sistema fotovoltaico dimensionado, se seleccionó un conjunto de 10 baterías conectadas en serie, cada una con una tensión nominal de 50 V. Esta configuración permite no solo cumplir con el nivel de tensión deseado, sino también asegurar un margen de seguridad ante fluctuaciones de carga.

5.5.1. Cálculo de la capacidad operativa del banco de baterías

Para determinar si el banco de baterías seleccionado puede cubrir adecuadamente las necesidades energéticas del sistema, se realizó el cálculo de la carga de operación considerando un grupo de 10 baterías conectadas en serie, cada una con una capacidad de 300 Ah y una tensión nominal de 50 V, lo que da una tensión total de 500 V.

La capacidad total del banco queda definida como:

$$Q_{\text{Total}} = 300\text{Ah}$$

Dado que las baterías están en serie, la capacidad en amperios-hora (Ah) no se multiplica por el número de baterías, pero sí lo hace la tensión total, lo que permite calcular la energía total almacenada:

$$E_{\text{baterias}} = 500\text{V} \times 300\text{A} \times H$$

$$E_{\text{baterías}} = 150\text{kWh/día}$$

Luego, se estimó la operación durante un período continuo de 6 horas. La carga de operación se obtuvo mediante la fórmula:

$$Q_{\text{Oper}} = I_{\text{DC}} \times T_{\text{oper}}$$

Sustituyendo valores:

$$Q_{\text{Oper}}(6 \text{ horas}) = 24.87\text{A} \times 6\text{h} = 149.22 \text{ Ah} \approx 150\text{Ah}$$

Esto indica que el sistema puede operar durante seis horas con una corriente de descarga de 24.87 A, sin agotar completamente la capacidad del banco de baterías, lo cual garantiza autonomía y protección de la vida útil de las celdas.

Por tanto, se concluye que la entrega de energía hacia el inversor bajo estas condiciones es de aproximadamente:

$$\text{Entrega al inversor: } 24.87 \text{ A}$$

Este cálculo respalda la viabilidad operativa del sistema durante el tiempo estimado de carga, confirmando que el banco de baterías está correctamente dimensionado para los requerimientos del sistema fotovoltaico propuesto.

5.5.2. Redimiendo con el sistema de baterías

El sistema de almacenamiento está conformado por 10 baterías de ion de litio de 50 V y 300Ah, conectadas en serie. Esta conexión da lugar a un banco de baterías con una tensión total de 500 V y una capacidad de 300 Ah, lo que representa una energía acumulada de 150 kWh, suficiente para respaldar la operación del sistema durante 24 horas.

Para verificar la viabilidad de carga del banco de baterías, se realizó un análisis basado en la irradiancia solar promedio del sitio, utilizando el software PVsyst. Las coordenadas geográficas del lugar de instalación (latitud 0.98°, longitud -79.61°) arrojaron una irradiancia efectiva de 4.3 horas sol pico (HSP).

Multiplicando la corriente generada por el sistema fotovoltaico por las HSP se obtuvo la carga diaria disponible:

$$Q = I_{\text{DC}} \times \text{HSP}$$

$$Q = 35.07\text{A} \times 4.03 = 150.8 \text{ Ah}$$

Este valor es suficiente para reponer la carga del banco de baterías en una jornada típica, considerando de operación de 6 horas.

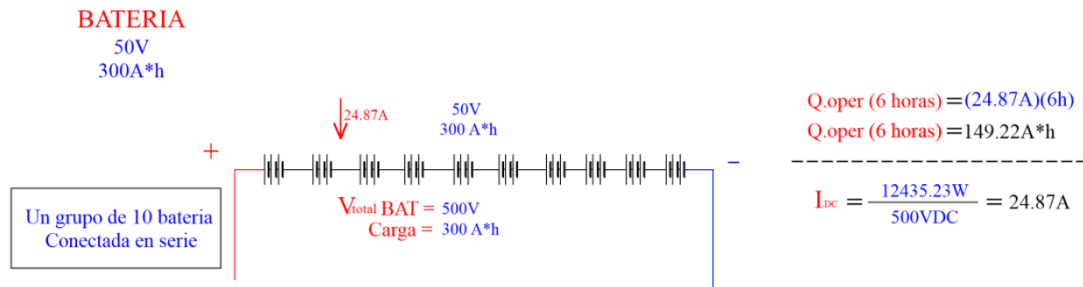


Ilustración 51. Diagrama de grupo de batería
Fuente: Elaboración propia en ProfiCAD

5.6. Inversor

Para este diseño se ha seleccionado un inversor híbrido residencial SOL-ARK de 15 kW, el cual ofrece compatibilidad tanto con paneles solares como con bancos de baterías de alta tensión. Su elección se fundamenta en la capacidad de operar de forma eficiente dentro del rango de tensión generado por el sistema fotovoltaico, así como en su versatilidad para distintas configuraciones de salida.


<p>Entrada de paneles solares (PV)</p> <p>Potencia máxima de entrada: 15,000 W</p> <p>Rango de voltaje MPPT: 150 – 500 V</p> <p>Voltaje DC máximo de entrada: 500 V</p> <p>Salida AC (corriente alterna)</p> <p>Voltaje nominal de salida AC: 120/240 V, 120/208 V o 220 V</p> <p>Frecuencia de operación: 50 / 60 Hz</p> <p>Corriente máxima de salida: 62.5 A</p>	 <p>Sol-Ark inversor híbrido residencial 15kW</p>
---	---

Tabla 6. Especificaciones del inversor
Fuente: Información técnica proporcionada por el fabricante Sol-Ark.

5.6.1. Análisis técnico del inversor seleccionado

La elección del inversor SOL-ARK de 15 kW requirió un análisis técnico detallado, a fin de verificar su compatibilidad con los niveles de tensión y potencia del sistema fotovoltaico propuesto. Para ello, se consideraron aspectos clave como la eficiencia de conversión, el voltaje de entrada y salida, y la corriente nominal en condiciones reales de operación.

El sistema trabaja con una tensión de entrada de 500 VDC y entrega una tensión de salida de 220 VAC, adecuada para el funcionamiento del transformador y las cargas conectadas.

5.6.2. Cálculo de corriente nominal en AC

Para una operación eficiente y segura, se adoptó un factor de utilización del 80 % respecto a la capacidad nominal del inversor. De esta manera, se determina la corriente nominal en salida alterna:

$$I = \frac{15000}{220} (0.8) = 54.55A$$

Esto implica que, bajo condiciones típicas, el inversor entregará una potencia real de:

$$P_{AC} = 220V \times 54.5A = 12000W$$

Determinación de la potencia nominal en DC

A partir de la potencia de salida en AC y considerando una eficiencia nominal del inversor del 96.5 %, se calcula la potencia requerida en corriente continua (DC) para abastecer esa demanda:

$$\eta\% = 96.5\% = 0.965$$

$$P_{DC} = \frac{12000W}{0.965} = 12435,23W$$

Este valor confirma que el sistema fotovoltaico, con una capacidad de generación de hasta 18 kW, puede alimentar correctamente al inversor sin exceder su capacidad nominal, incluso considerando pérdidas por conversión.

5.6.3. Rendimiento del inversor con el banco de baterías

El inversor seleccionado (SOL-ARK 15 kW) opera con una eficiencia del 96.5 %, y para efectos de diseño se ha considerado un factor de operación del 80 % de su capacidad nominal, a fin de evitar sobrecargas y garantizar mayor vida útil.

Primero, se calcula la corriente nominal en salida AC:

$$I = \frac{15000}{220} = 68.18 \text{ A}$$

Aplicando el factor de operación del 80 %:

$$I_{OP} = 68.18 \times 0.8 = 54.55 \text{ A}$$

La potencia correspondiente al 80 % del inversor es:

$$P_{AC} = 220 \text{ V} \times 54.55 \text{ A}$$

Luego, considerando la eficiencia del inversor (96.5 %), se determina la potencia requerida desde el banco de baterías:

$$P_{DC} = \frac{12000}{0.965} = 12435.23 \text{ W}$$

Y con esta potencia, la corriente de descarga del banco es:

$$I_{Baterias} = \frac{12435.23}{500} = 24.87 \text{ A}$$

Finalmente, para un periodo de operación de 6 horas continuas, se calcula la carga total consumida diariamente:

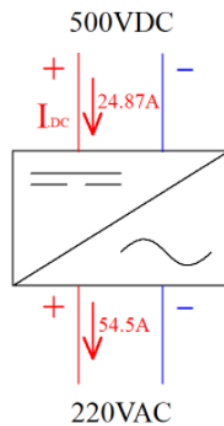
$$Q = I \times t$$

$$Q = 24.87 \text{ A} \times 6 \text{ h}$$

$$Q = 149.22 \text{ Ah} \approx 150 \text{ Ah}$$

INVERSOR(80%)

15kW
 500VDC
 220VAC
 54.5A.AC
 η%= 96.5%



$$I_{dc} = \frac{12435.23W}{500VDC} = 24.87A$$

$$P_{dc} = \frac{12000W}{0.965} = 12435.23W$$

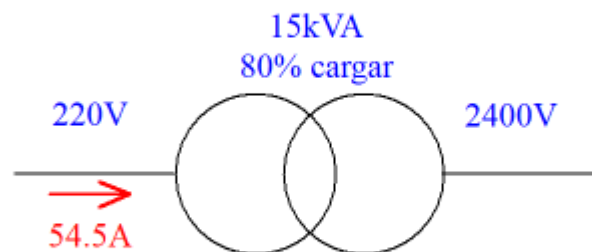
$$I_{ac} = \frac{15000W}{220VAC} = 54.5A$$

$$P_{ac} = (220VAC) (54.5A) = 12000W$$

Ilustración 52. Diagrama del inversor
 Fuente: Elaboración propia en ProfiCAD

5.7. Aplicación al transformador

De acuerdo con los cálculos realizados, el inversor operando al 80 % de su capacidad nominal (54.55 A) es suficiente para alimentar el transformador monofásico de 15 kVA y 220 V, sin necesidad de que este trabaje al 100 % de su carga. Esto proporciona un margen operativo seguro, mejora la eficiencia del sistema y reduce el estrés sobre los componentes.

Transformador monofásico

t.operación = 6 horas/días [10h - 16h]

Ilustración 53. Diagrama del transformador
 Fuente: Elaboración propia en ProfiCAD

5.8. El problema de la corriente inrush en transformadores

La energización de un transformador da lugar al caso más severo de corriente de irrupción, y el flujo en el núcleo puede alcanzar un valor teórico máximo de dos a tres veces el valor nominal del flujo de pico. No hay evidencia directa de que la energización de un transformador pueda causar una falla inmediata debido a las altas corrientes de irrupción. Sin embargo, las fallas en el aislamiento de transformadores de potencia que se energizan con frecuencia en condición sin carga respaldan la sospecha de que las corrientes de irrupción tienen un efecto perjudicial.

Un problema más típico causado por la energización de transformadores se debe a la interacción de armónicos con otros componentes del sistema, lo cual puede desarrollarse en sobretensiones y fenómenos de resonancia. El estudio de la energización de un transformador instalado en una instalación industrial resalta los problemas debido a armónicos, sobretensiones y resonancias [27].

5.9. Cierre en pico de tensión vs cruce por cero

Un SSR de cruce por cero no siempre conmuta exactamente en el punto cero de voltaje. Puede requerir un milisegundo o más para que el circuito reaccione. Por lo tanto, las cargas pueden no estar completamente activadas hasta que el voltaje de línea sea de 15 a 20 voltios. En este caso, la corriente de irrupción no es tan grande, pero aun así es potencialmente destructiva. Además, un SSR aleatorio puede, en ocasiones, conmutar justo antes o después del cruce por cero. La mejor técnica para encender transformadores y otras cargas altamente inductivas y saturables es utilizar un dispositivo que conmute en el pico de voltaje. Conmutar en el pico de voltaje da lugar a una sobrecorriente mínima, si es que se presenta alguna [28].

5.10. Aplicación práctica en relés y SSR

El uso de relés de estado sólido (SSR) con disparo instantáneo o control de ángulo de fase representa una solución eficaz para la energización controlada de transformadores, particularmente en condiciones donde se busca mitigar la corriente de irrupción. Esta técnica permite sincronizar la conexión del transformador con el pico de la tensión de línea, momento en el cual el voltaje es máximo y la variación de corriente (di/dt) es mínima. Al alinear esta conmutación con el flujo magnético del núcleo, se logra una

significativa reducción de la corriente de irrupción, evitando así que el núcleo entre en saturación [29].

Para una aplicación más precisa, se recomienda implementar SSR con activación gestionada por un sistema externo, como un microcontrolador, FPGA o un circuito temporizado, que permita detectar el instante exacto del pico de tensión y realizar la conmutación en ese momento. En caso de utilizar un SSR de cruce por cero, se sugiere incorporar un retardo programado para evitar que la conmutación coincida con el cruce por cero del voltaje, condición que puede provocar corrientes de irrupción elevadas y peligrosas para el sistema.

Pruebas experimentales respaldan esta técnica, mostrando que la conmutación en el pico de tensión puede reducir la corriente de irrupción a niveles comparables con la corriente nominal. Los beneficios comprobados incluyen: ausencia de saturación del núcleo, disminución del estrés térmico sobre los devanados, mayor vida útil del transformador y reducción de disparos innecesarios en los sistemas de protección.

5.11. Sistema para evitar la inrush

5.11.1. Temporizador modelo XTD 316



Ilustración 54. Temporizador XTD-316

Fuente: <https://www.directindustry.es/prod/automatismos-control-programacion-sl/product-231733-2317702.html>

En esta parte se usará un temporizador de precisión de 4.16ms lo cual será XTD-360 milisegundo es un dispositivo de temporización electrónica de uso industrial, desarrollado por la empresa Automatismos Control y Programación. Entre sus características más relevantes destacan:

- Rango de tiempo configurable: de 0,001 segundos (1 ms) hasta 999 segundos, con posibilidad de ajuste fino gracias a su display digital de alta resolución.

- Modo de operación seleccionable: retardo a la conexión, retardo a la desconexión, funcionamiento cíclico, entre otros.
- Salida por relé de contacto seco (NA/NC), apta para señales de control de SSR.
- Display dual: permite la visualización del valor configurado y del tiempo real de conteo.
- Alta inmunidad electromagnética (EMI), ideal para entornos industriales.

Estas características permiten implementar una lógica de activación temporizada, en la cual se genera un pulso de activación hacia el relé de estado sólido exactamente en el intervalo deseado después de una señal de disparo como el encendido del sistema o una señal de sincronización con el cruce por cero de red.

5.11.2. Justificación técnica de la selección

El temporizador XTD-316 fue seleccionado frente a otras opciones disponibles por las siguientes razones:

- **Precisión de milisegundos:** La necesidad de retardar la activación del SSR exactamente 4,16 ms después de una condición de disparo descarta el uso de temporizadores convencionales como el Omron H3CR o el Autonics LE3S, que tienen resoluciones mínimas de 10 ms. El XTD-316, al permitir ajustes desde 1 ms, es perfectamente adecuado para este nivel de control temporal.
- **Fiabilidad y estandarización:** El uso de un temporizador industrial certificado como el XTD-316 garantiza mayor confiabilidad a largo plazo, y asegura compatibilidad con normativas técnicas de seguridad eléctrica. Su montaje en panel o riel DIN lo hace fácilmente integrable en tableros eléctricos normalizados.

En vista de lo expuesto, se concluye que el temporizador XTD - 316 representa la mejor opción para implementar el retardo de activación del transformador de 15 kVA en este sistema fotovoltaico híbrido, ya que combina:

- Precisión temporal en milisegundos.
- Compatibilidad con SSR industriales.

- Alimentación desde banco DC.
- Fiabilidad y robustez industrial.

Podemos decir que esta elección no solo resuelve técnicamente la problemática del inrush current, sino que también optimiza la eficiencia del sistema al reducir riesgos de activación brusca, sobrecorriente o fallos prematuros en los dispositivos de conmutación.

5.12. Selección del relé de estado sólido Carlo Gavazzi RM1A60D25

5.12.1. Relé estado sólido con integración cruce por cero



Ilustración 55. Relé de estado sólido RM1A60D25

Fuente: <https://www.directindustry.es/prod/automatismos-control-programacion-sl/product-231733-2317702.html>

Descripción relé estado sólido:

- Conmutación de cruce por cero
- Corriente nominal 25A
- Tensión de control 4 - 32 V CC
- Protección contra sobretensión incorporada

La conmutación segura de cargas inductivas de gran potencia, como transformadores, requiere dispositivos que permitan una activación controlada y que eviten fenómenos transitorios como la corriente de irrupción. En este proyecto, se diseñó un sistema híbrido alimentado por energía fotovoltaica, que incorpora un transformador monofásico de 15 kVA. Dado que este transformador debe ser energizado desde un inversor de 220 VAC, se hace necesaria la selección de un dispositivo de conmutación robusto, eficiente y sincronizado con el cruce por cero de la onda de tensión alterna. Para este propósito, se seleccionó el relé de estado sólido Carlo Gavazzi RM1A60D25, cuyas características técnicas satisfacen los requisitos funcionales, operativos y de protección del sistema.

5.13. Funcionamiento del circuito

El sistema de control implementado utiliza un temporizador digital de alta precisión modelo XTD-316, configurado para operar en un rango de milisegundos. Al recibir alimentación de 12 VDC en sus terminales 1 y 3, el temporizador inicia la cuenta regresiva correspondiente, en este caso ajustada a 4,6 milisegundos, con el fin de sincronizar el disparo con el cruce por cero de la onda alterna.

Una vez transcurrido el tiempo configurado, el temporizador cierra su contacto normalmente abierto entre los terminales 11 y 9, permitiendo el paso de la señal de control hacia el relé de estado sólido SSR modelo RM1A60D25. Este relé recibe la señal de activación a través de sus terminales de entrada: el terminal 3 se conecta al positivo (+) proveniente del temporizador, mientras que el terminal 4 está conectado directamente a la línea negativa (-) de alimentación.

Al recibir esta señal, el relé SSR activa su salida de potencia, cerrando internamente su circuito entre los terminales 1 y 2, permitiendo así la conducción de corriente alterna. En este punto, la fase L1 de la alimentación AC se transmite desde el relé hacia el terminal X2 del transformador, mientras que la fase L2 se conecta directamente al terminal X1 del mismo. De esta forma, el transformador de 15 kVA, con relación 220 V / 2400 V, es energizado de manera sincronizada y controlada.

Este mecanismo garantiza que la energización se realice en condiciones óptimas, específicamente durante el cruce por cero de la tensión alterna, lo cual reduce significativamente el riesgo de generación de corriente de irrupción (inrush) al momento de la conexión del transformador.

5.14. Fuente Conmutada de alimentación



Ilustración 56. Fuente conmutada de alimentación

Fuente: <https://www.tecneu.com/products/fuente-conmutada-de-alimentacion-12v-5a-60w-110-220vca?srsItid=AfmBOopszjzzkIfWGm3pguQQd40i-yFR3zQXpZppHhKFC38HMzCID5N>

Descripción fuente conmutada de alimentación

Voltaje de entrada: 110/220 VAC \pm 15%

Tensión de salida: 12 VDC

Potencia: 24W

La fuente conmutada seleccionada proporciona una salida estable de 12 VDC, con una potencia de 24 W, siendo ideal para alimentar circuitos de control como el temporizador XTD-316 y el relé SSR. Su entrada universal 110/220 VAC \pm 15 % permite adaptabilidad a distintas redes eléctricas. Este tipo de fuente es altamente eficiente $>$ 85 %, compacta y segura, ya que incorpora protecciones contra sobrecarga, cortocircuito y sobretensión. Su diseño con ventilación pasiva y bajo nivel de rizado garantiza un suministro limpio y continuo, fundamental para el funcionamiento confiable del sistema de control.

5.15. Diagrama del circuito

El siguiente diagrama representa de manera detallada la conexión eléctrica del sistema de control diseñado para la energización sincronizada de un transformador de 15 kVA. Este sistema se basa en la integración de un temporizador digital modelo XTD-316, configurado para operar con una precisión en el rango de milisegundos, y un relé de estado sólido Carlo Gavazzi modelo RM1A60D25, el cual permite la conmutación de carga de forma segura y sin contactos mecánicos.

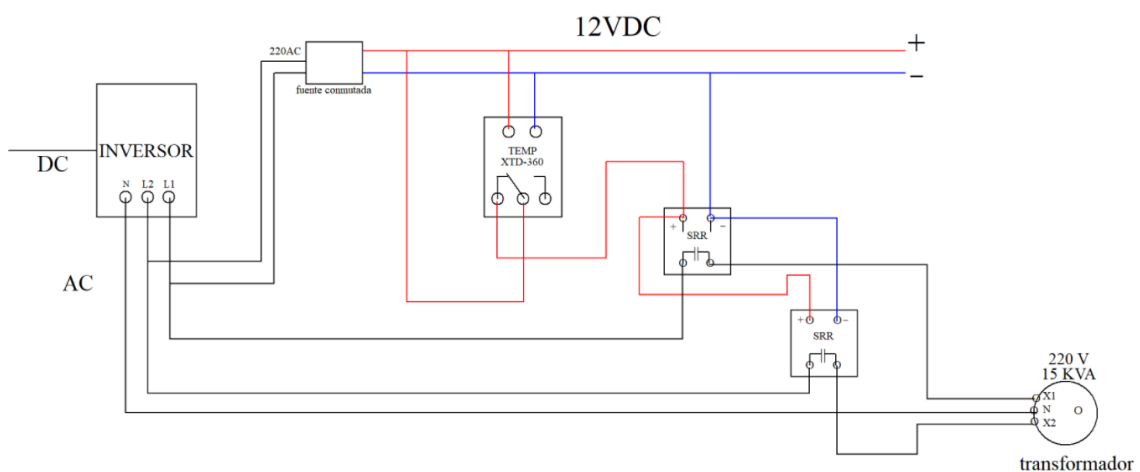


Ilustración 57. Diagrama del sistema de evitar la inrush
Fuente: Elaboración propia en ProfiCAD

De esta manera, al energizar el transformador de 15 kVA con una tensión de 220 V, se minimizará el impacto de las corrientes de irrupción, evitando posibles afectaciones al funcionamiento normal del sistema, así como daños en los componentes internos del transformador y en los dispositivos de control asociados.

5.16. Diagrama del sistema fotovoltaico

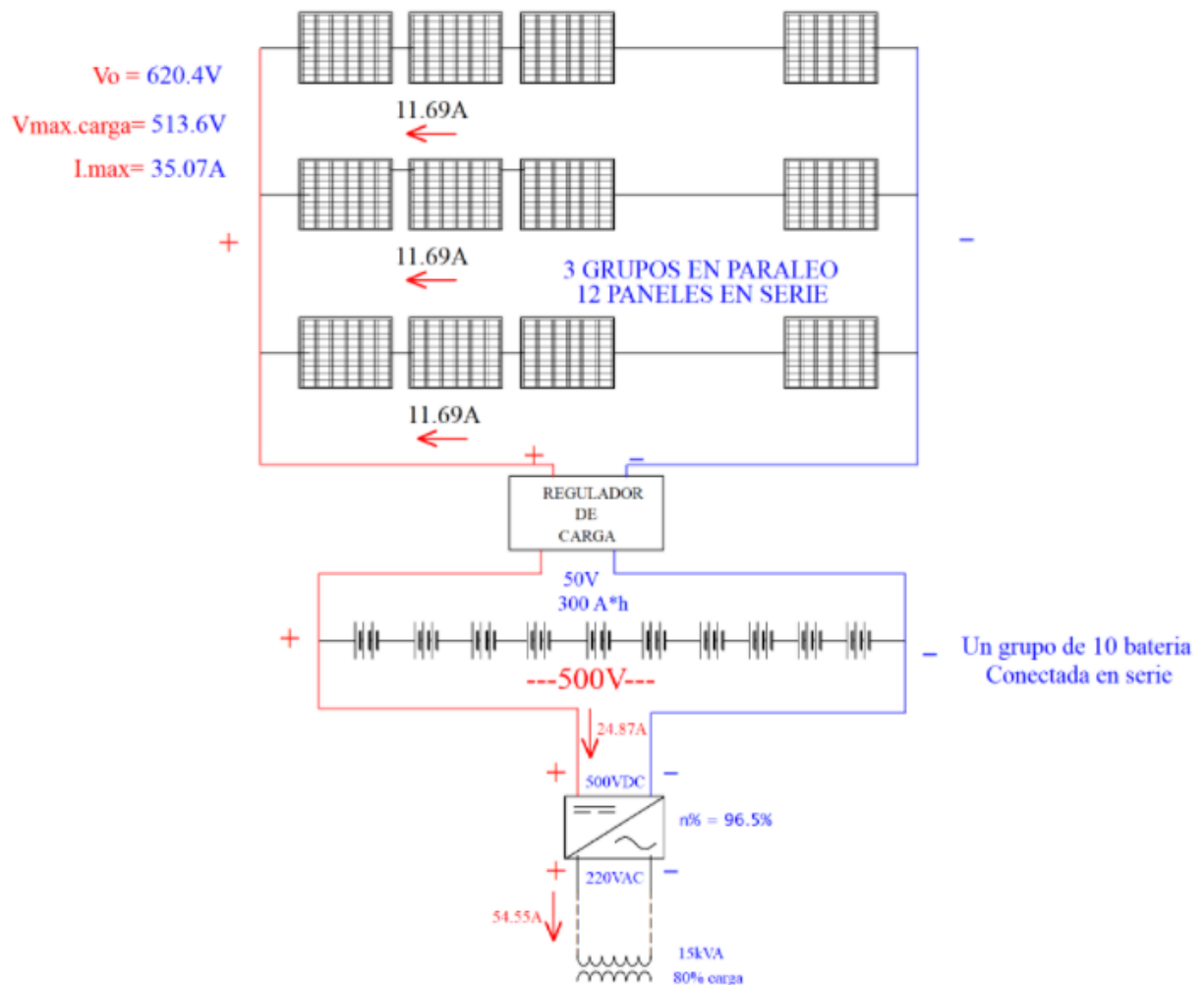
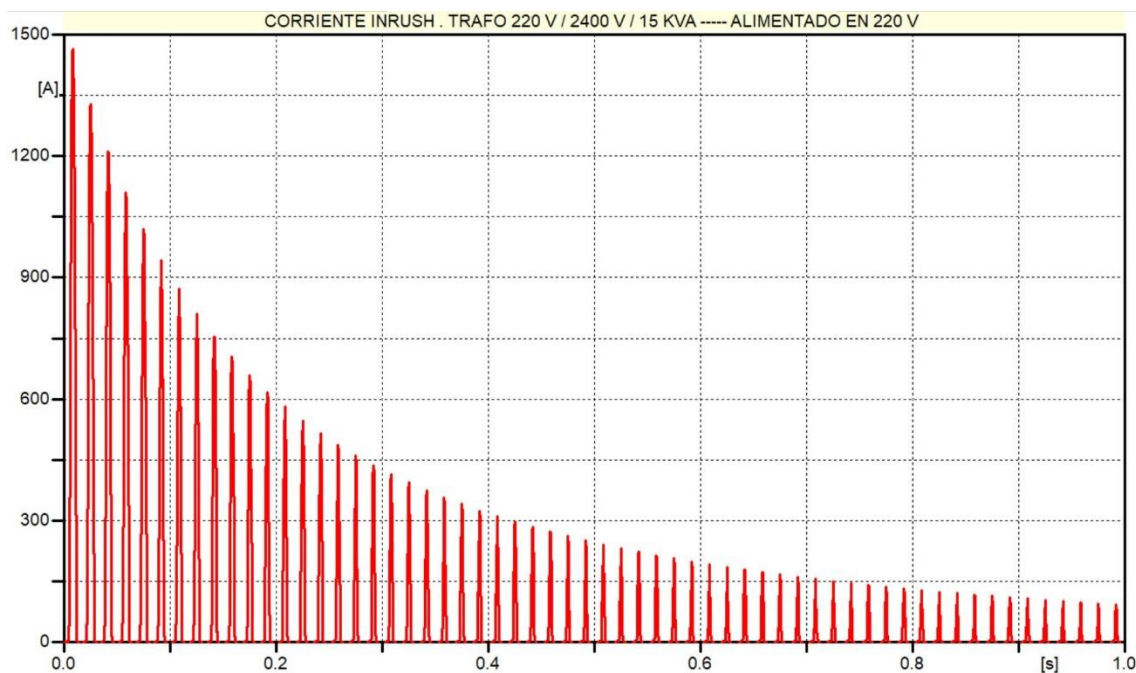


Ilustración 58. Diagrama del sistema fotovoltaico
Fuente: Elaboración propia en ProfiCAD

6. CAPITULO VI: RESULTADOS

6.1. Simulación de la corriente inrush lado 220V



*Ilustración 59. Corriente de irrupción en transformador alimentado en 220 V.
Fuente: Elaboración del autor mediante simulación en el software ATP-DRAW*

En la figura se presenta la gráfica de corriente de irrupción (inrush current) correspondiente a un transformador monofásico de 15 kVA, con relación de tensión 220 V / 2400 V, alimentado en el primario con 220 V. Esta simulación permite observar el comportamiento transitorio de la corriente al momento de energizar el transformador en vacío, uno de los eventos más críticos en sistemas eléctricos.

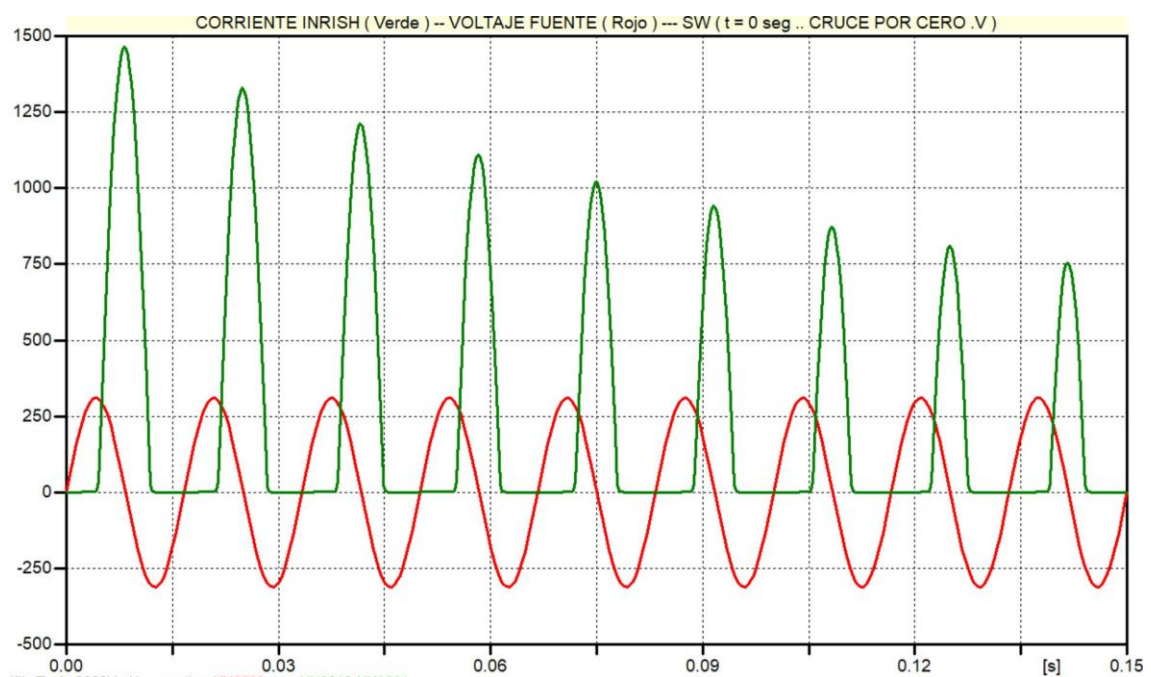
En la simulación se muestra el comportamiento típico de la corriente de irrupción en un transformador monofásico durante el instante de energización. Esta corriente transitoria aparece cuando se conecta el transformador a la red sin carga, especialmente si la conmutación ocurre cerca del cruce por cero de la tensión, lo cual puede inducir una magnetización súbita del núcleo.

Como se observa en el gráfico, al iniciar la simulación ($t = 0$ s), la corriente alcanza un valor pico elevado, superior a los 1300 A, muy por encima de su régimen nominal. Posteriormente, se produce un decaimiento exponencial en la envolvente de la señal, que

se estabiliza tras aproximadamente 0.6 segundos, momento en el cual el transformador entra en régimen permanente.

Este fenómeno es resultado de la magnetización residual, la no linealidad del núcleo y la condición inicial del flujo, y puede causar efectos negativos como disparo de protecciones, estrés térmico en los devanados o distorsión en la calidad de la energía si no se controla adecuadamente.

6.2. Simulación de la corriente inrush y el voltaje fuente



*Ilustración 60. Corriente de irrupción y voltaje de alimentación del transformador
Fuente: Elaboración del autor mediante simulación en el software ATP-DRAW*

Se observa la comparación entre la corriente de irrupción (inrush) y el voltaje de la fuente al momento de energizar un transformador monofásico de 15 kVA, con relación 220 V / 2400 V. La gráfica corresponde a los primeros 150 milisegundos posteriores al cierre del interruptor (SW), el cual ocurre en el cruce por cero voltios de la fuente, es decir, cuando el voltaje instantáneo de la señal senoidal es cero.

La línea roja representa el voltaje de la fuente, mientras que la línea verde muestra la corriente de irrupción absorbida por el transformador. Como se puede observar, la

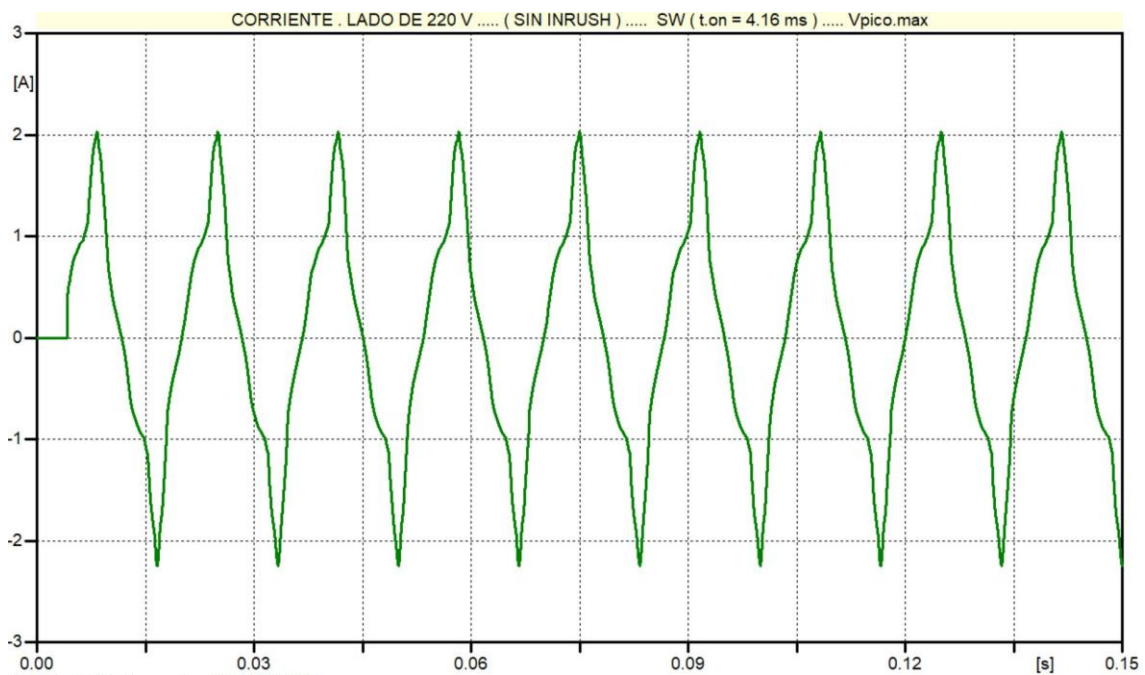
corriente alcanza picos de hasta 1400 A, lo cual es casi 100 veces mayor que la corriente nominal del transformador.

Este fenómeno se debe al efecto de saturación del núcleo, agravado por el hecho de que la energización se produce en un instante desfavorable pese a que ocurre en cruce por cero de voltaje, la condición de flujo remanente y la fase de la fuente hacen que el núcleo se satura. Esta saturación provoca que el núcleo no pueda limitar el flujo magnético, lo que resulta en una demanda masiva de corriente para magnetizarlo rápidamente.

Durante los primeros ciclos, la corriente de irrupción es altamente asimétrica y distorsionada, con una forma de onda cuadrada e impulsiva, muy distinta de la señal senoidal esperada. Posteriormente, y aunque no se muestra completamente en esta imagen, dicha corriente comenzará a disminuir gradualmente hasta alcanzar su estado estable.

Este tipo de análisis es fundamental para comprender el comportamiento de los transformadores al energizarse y resaltar la importancia del diseño de protecciones adecuadas, evitando que dispositivos de protección mal calibrados interpreten estos eventos como fallas reales.

6.3. Simulación de la corriente sin inrush lado 220V



*Ilustración 61. Corriente en el lado de 220 V sin presencia de inrush
Fuente: Elaboración del autor mediante simulación en el software ATP-DRAW*

En esta figura se presenta la forma de onda de la corriente en el lado primario (220 V) de un transformador de 15 kVA, bajo condiciones de energización sin presencia de corriente inrush. A diferencia de los casos anteriores, el interruptor se ha cerrado en un momento adecuado de la onda de tensión, específicamente en el pico máximo del voltaje (4,16 ms), tal como se indica en la cabecera de la gráfica.

En esta estrategia de energización controlada, el núcleo del transformador no entra en saturación, lo cual permite que la corriente absorbida sea sinusoidal, simétrica y de baja magnitud, con un pico cercano a los 2 A, muy por debajo de los valores extremos que se presentan cuando el transformador se energiza en cruce por cero o con flujo remanente desfavorable.

La corriente tiene un perfil estable y repetitivo, sin transitorios ni deformaciones severas, lo cual evidencia que el transformador ha entrado directamente en régimen permanente desde el primer instante. Esta condición es altamente deseable en la operación práctica, ya que:

- Reduce esfuerzos térmicos en bobinados y núcleo.
- Evita disparos erróneos de protecciones.
- Mejora la confiabilidad del sistema durante maniobras.

Este resultado demuestra la importancia de sincronizar el cierre del interruptor con el momento adecuado del ciclo de tensión, especialmente cuando se energizan transformadores grandes o sensibles. También subraya el valor de las simulaciones como herramienta para prever y mitigar el fenómeno de inrush mediante técnicas como energización en pico o precarga del núcleo.

6.4. Corriente de corto circuito del panel solar simulada en ATP-DRAW

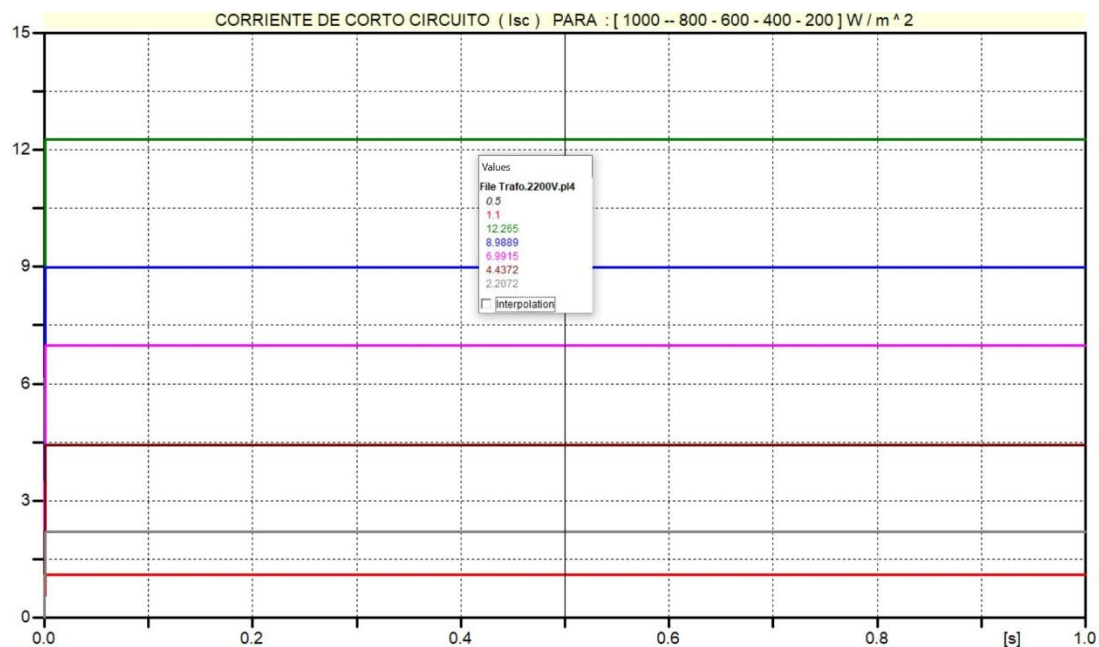


Ilustración 62. Corriente de cortocircuito para diferentes niveles de irradiancia solar.
Fuente: Elaboración del autor mediante simulación en el software ATP-DRAW

La figura presenta la evolución temporal de la corriente de cortocircuito generada por un panel solar para distintos niveles de irradiancia: 1000, 800, 600, 400 y 200 W/m². Esta simulación ha sido realizada en ATP-DRAW con base en modelos de resistencias no lineales programadas a partir de curvas I-V específicas para cada condición de iluminación.

Como se puede observar, la corriente de cortocircuito se mantiene constante en el tiempo para cada nivel de irradiancia, lo cual es esperable al tratarse de una condición de cortocircuito estable bajo irradiancia fija. Los valores medidos de I_{sc} son los siguientes:

- **12.27A** para 1000 W/m^2
- **8.99A** para 800 W/m^2
- **6.99A** para 600 W/m^2
- **4.44A** para 400 W/m^2
- **2.21A** para 200 W/m^2

Estos resultados reflejan un comportamiento lineal entre la corriente de cortocircuito y la irradiancia solar, confirmando la validez del modelo utilizado. El voltaje, como se ha visto en las curvas I-V anteriores, permanece prácticamente constante, mientras que la corriente se ajusta proporcionalmente a la intensidad de radiación recibida por el panel.

6.5. Simulación de la corriente nominal del panel solar

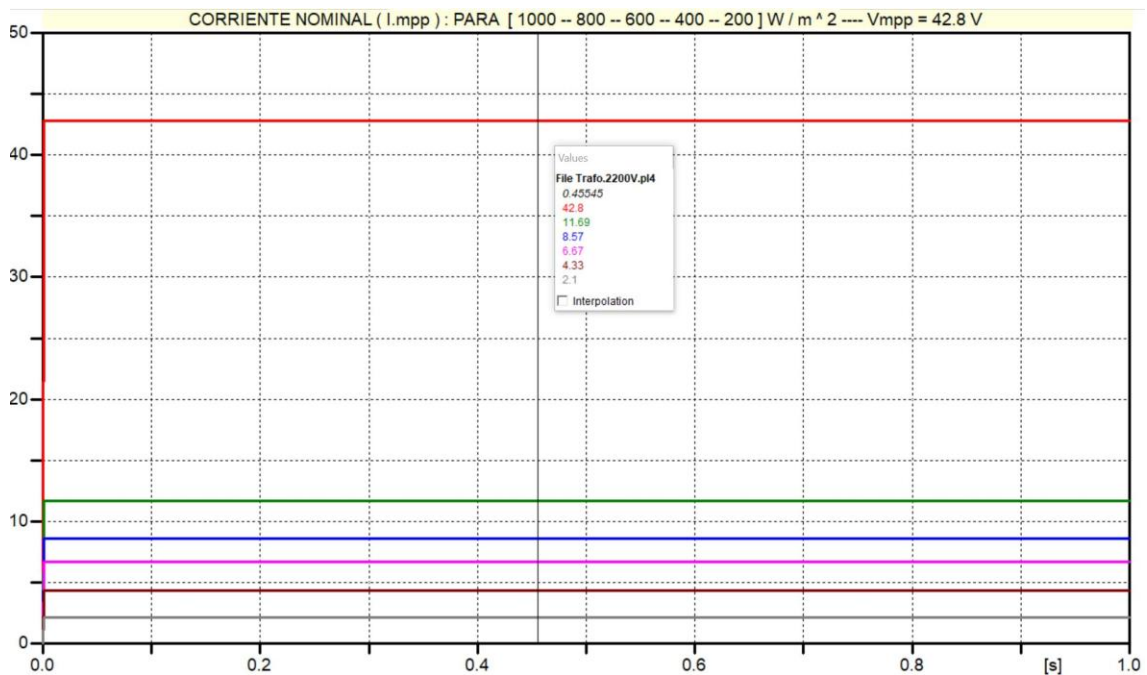


Ilustración 63. Corriente de operación nominal para diferentes niveles de irradiancia solar.
Fuente: Elaboración del autor mediante simulación en el software ATP-DRAW

El gráfico muestra la variación de la corriente nominal I_{mpp} generada por un módulo fotovoltaico en función de diferentes niveles de irradiancia solar, manteniendo constante el voltaje en el punto de máxima potencia $V_{mpp} = 42.8 \text{ V}$. Se observa que, a mayor irradiancia, mayor es la corriente generada, con un comportamiento lineal y estable en el tiempo. A 1000 W/m^2 , la corriente alcanza aproximadamente 42.8 A , mientras que con irradiancias menores $800, 600, 400, 200 \text{ W/m}^2$, la corriente disminuye proporcionalmente. Este comportamiento confirma el buen funcionamiento del modelo fotovoltaico bajo condiciones ideales y estables, sin presencia de transitorios ni sombras durante el periodo de análisis.

6.6. Voltaje a vacío simulada en ATP

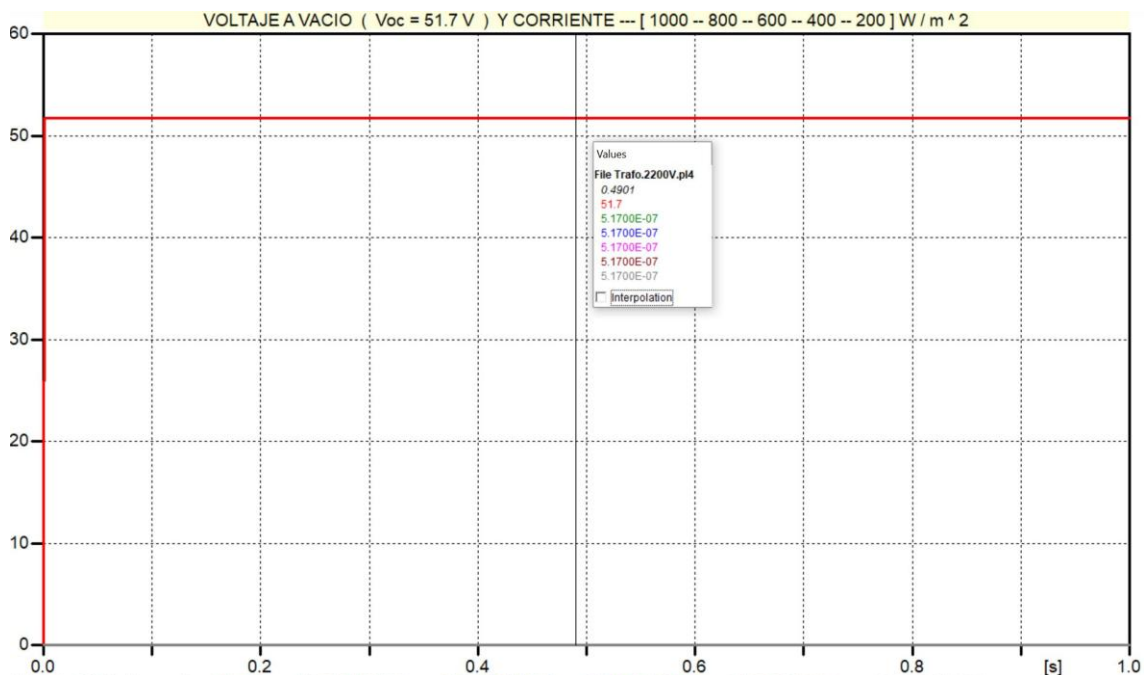


Ilustración 64. Voltaje vacío del fotovoltaico bajo diferentes niveles de irradiancia.
Fuente: Elaboración del autor mediante simulación en el software ATP-DRAW

La figura muestra el comportamiento del voltaje en circuito abierto del panel solar bajo distintas condiciones de irradiancia: $1000, 800, 600, 400$ y 200 W/m^2 . La simulación fue realizada en ATP-DRAW y representa la salida del panel cuando no existe carga conectada, es decir, en condición de circuito abierto.

El resultado indica que el voltaje se mantiene prácticamente constante en 51.7 V , independientemente del nivel de irradiancia. Este comportamiento es característico de los

paneles solares, donde el voltaje a vacío es poco sensible a la variación de la radiación solar y depende principalmente de la temperatura de la celda. En la simulación, la corriente es prácticamente nula en todos los casos, confirmando que se ha modelado correctamente el estado de circuito abierto.

7. Cronograma

NO.	ACTIVIDAD	MES 1	MES 2	MES 3	MES 4	MES 5
1	Investigación sobre transformadores sumergibles y sistemas fotovoltaicos					
2	Modelado del transformador en ATP-DRAW					
3	Dimensionamiento del sistema fotovoltaico propuesto					
4	Simulación del arranque del sistema en ATP-DRAW					
5	Análisis de resultados eléctricos y energéticos obtenidos					
6	Redacción de conclusiones y recomendaciones finales					

8. Presupuesto

N°	DETALLE	VALOR
1	INTERNET	\$127
2	MOVILIZACION	\$130
3	ALIMENTACION	\$125
4	VARIOS	\$50
5	TOTAL	\$432

Tabla 7. Presupuesto

9. CAPITULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

9.1. Conclusiones

- El presente estudio se centró en el diseño y análisis de un sistema fotovoltaico destinado a alimentar eléctricamente un transformador de distribución monofásico de 15 kVA.
- Para alimentar un transformador monofásico de 15 kVA se requiere un sistema fotovoltaico compuesto por 36 paneles solares monocristalinos de 500 W, organizados en 3 grupos de 12 paneles conectados en serie, y estos grupos conectados entre sí en paralelo.
- Cada panel presenta una potencia nominal de 500 W, una tensión de carga de 42.8 V y una tensión en circuito abierto de 51.7 V, lo que garantiza un voltaje adecuado en el arreglo total para la operación del sistema.
- Se emplea un banco de 10 baterías de litio de 50 V y 300 Ah, conectadas en serie, lo cual proporciona un voltaje total de 500 VDC, suficiente para respaldar el sistema en periodos sin irradiación solar.
- El sistema utiliza un inversor de 500 VDC a 220 VAC con una potencia de salida de 15 kW, el cual permite la conversión eficiente de energía para alimentar la carga a través del transformador.
- Para evitar los efectos de corrientes de irrupción al momento de energizar el transformador, se implementa un relé electrónico de estado sólido (SSR) con detección de cruce por cero y un temporizador de alta precisión calibrado a 4.16 ms, asegurando un arranque controlado y seguro del equipo.

9.2. Recomendaciones

- Se recomienda realizar un estudio detallado para la selección e instalación de dispositivos de protección contra sobrecorriente y sobretensión en el transformador.
- Se sugiere efectuar un estudio complementario sobre la variación del voltaje generado por los módulos fotovoltaicos en función de la irradiancia solar y la temperatura ambiente.
- Es necesario realizar un análisis para la correcta implementación del Sistema de Puesta a Tierra (SPT) en el transformador, así como la incorporación de protecciones contra descargas atmosféricas y transitorios eléctricos.
- A nivel de laboratorio en carrera de la universidad, realizar pruebas de sistema fotovoltaicos que alimente cargas no lineales como motores, transformadores, etc.

10. REFERENCIAS

- [1] Planas, O. (2015). Radiación solar. *Solar Energía*. https://solar-energia.net/que-es-energia-solar/radiacion-solar#google_vignette
- [2] Duffie, J. A. & Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*. Wiley.
- [3] Rodríguez Rosales, K., De Moure Flores, F. J., & Quiñones Galván, J. G. (julio-septiembre de 2020). *Energía Solar Fotovoltaica*.
- [4] Martín Álvarez, S. (2019). Estudio de las células y paneles de una. Estudio de las células y paneles de una. Universidad de Valladolid, Valladolid. <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/36784>
- [5] García, M. & López, R. (2018). *Fundamentos de la energía solar fotovoltaica*. Editorial Reverté.
- [6] Martíl, I. (2023, noviembre 15). *Estructura y peculiaridades de los paneles fotovoltaicos estándar*. CDe Comunicación. <https://material-electrico.cdecomunicacion.es/opinion/ignacio-martil/2023/11/15/estructura-y-peculiaridades-de-los-paneles-fotovoltaicos-estandares>
- [7] Pérez-Hernández, R. et al. (2020). "Materiales semiconductores aplicados en celdas solares", *Revista Iberoamericana de Energías Renovables*, 5(2), 34-45.
- [8] Serrano, R. (18 de 08 de 2017). *TRITEC INTERVENTO*. Obtenido de TIPOS DE PANELES FOTOVOLTAICOS: <https://tritec-intervento.cl/tipos-de-paneles-fotovoltaicos/>
- [9] Ortega, L. & Salinas, M. (2019). *Sistemas de almacenamiento en energía solar fotovoltaica*. Editorial UPM.
- [10] Pérez-Luna, D. et al. (2020). "Evaluación de desempeño de baterías solares en zonas rurales", *Revista de Energías Renovables Latinoamericanas*, 7(3), 45-59.
- [11] Jiménez, R. & Torres, A. (2018). *Introducción a los sistemas fotovoltaicos autónomos*. Universidad Nacional de Colombia.
- [12] Quintero et al., "Baterías de Ion Litio: características y aplicaciones" — revista *I+D Tecnológico*, 2021. Disponible en PDF: este artículo destaca características como alta densidad energética, eficiencia, vida útil y gestión mediante BMS https://accscat.com/wp-content/uploads/2024/07/Guia-tecnica-litio-junio_2024.pdf
- [13] Solar-energia.net (2023) – *Baterías de gel: funcionamiento, pros y contras*: explica el principio del electrolito gelificado, ventajas, desventajas y aplicaciones en sistemas solares
- [14] Baterías de flujo redox: una tecnología sostenible, CIC energiGUNE, julio 2021 <https://cicenergigune.com/es/blog/baterias-flujo-redox-tecnologia-sostenible>

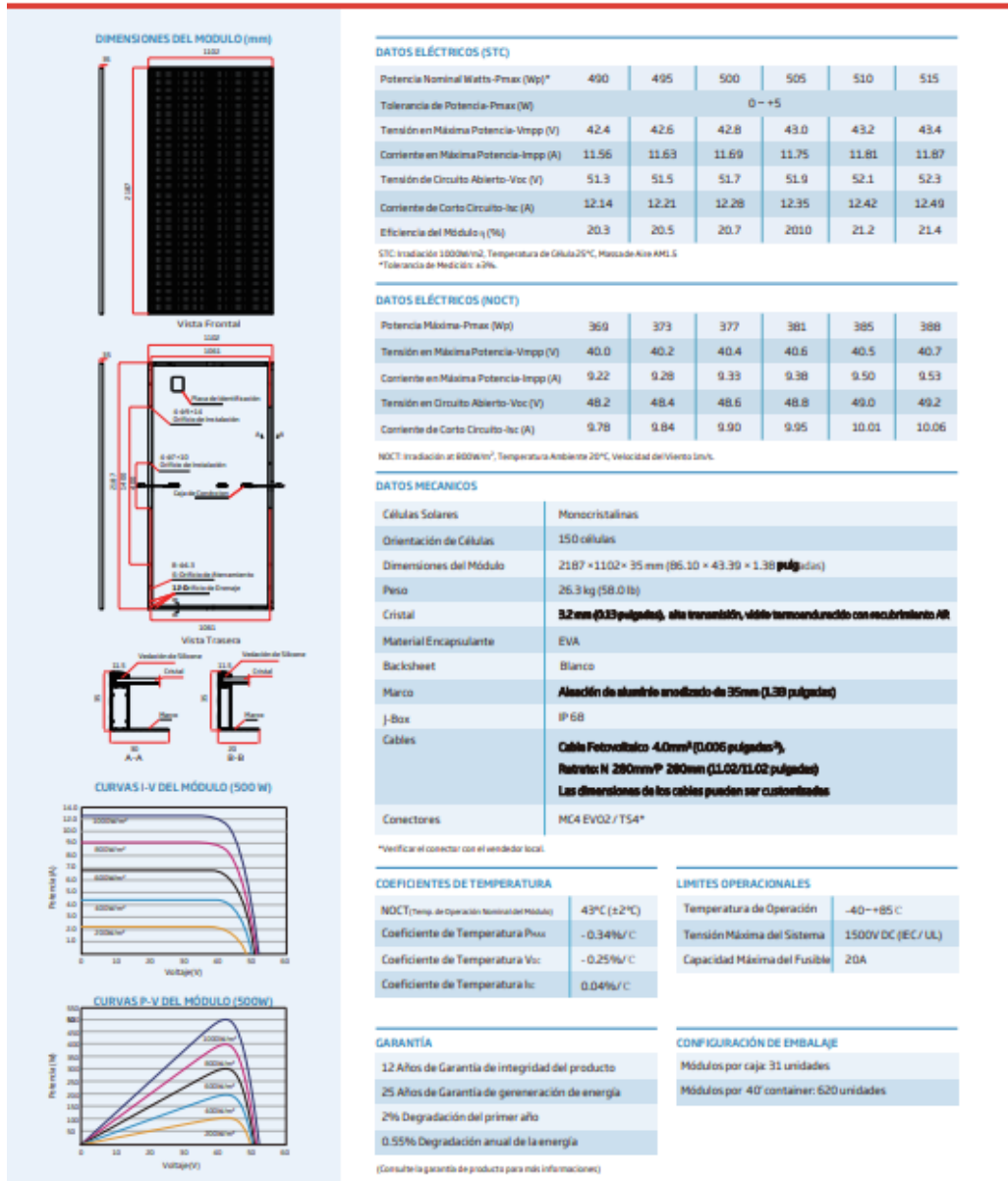
- [15] Chapman, S. J. (2007). *Máquinas eléctricas* (4.^a ed.). McGraw-Hill.
- [16] G. R. Slemon y A. Straughen, *Máquinas eléctricas*, McGraw-Hill Interamericana, 2005.
- [17] WAGO (2023) – “¿Qué es la corriente de irrupción y cómo se controla?”
<https://www.wago.com/es/tecnologia-de-conexion/que-es-la-corriente-de-irrupcion/p/230.html>
- [18] Martínez, L. et al. (2020). "Rol del controlador de carga en la optimización de sistemas solares", *Revista Iberoamericana de Ingeniería Eléctrica*, 6(1), 55-67.
- [19] Maiso Mantaras, C. ¿Qué es un inversor solar? *Solar360*. Recuperado el 12 de mayo de 2025, de <https://www.solar360.es/blog/autoconsumo/que-es-un-inversor-solar>
- [20] Solarama. Seguridad para sistemas fotovoltaicos. *Solarama*. Recuperado el 12 de mayo de 2025, de <https://solarama.mx/blog/seguridad-para-sistemas-fotovoltaicos/#:~:text=La%20seguridad%20en%20la%20instalaci%C3%B3n,distribuidor%20de%20Solarama%20cont%C3%A1ctanos%20aqu%C3%AD>
- [21] Sánchez, P. & Torres, E. (2021). Manual de diseño de sistemas fotovoltaicos con criterios de seguridad eléctrica.
- [22] WAGO GmbH & Co. KG. (2023). *¿Qué es la conmutación en cruce por cero?* Disponible en: <https://www.wago.com/es/tecnologia-de-conexion/conmutacion-en-cruce-por-cero/p/230.html>
- [23] Adria. (2024). Solar panel wiring. JOCA Cable. <https://joca-cable.com/es/blog/solar-panel->
- [24] Fidestec, “Funciones adicionales”: protecciones y soft-start
<https://fidestec.com/blog/fuentes-de-alimentacion-conmutadas-09/>
- [25] Mermoud, A., & Lejeune, T. (2010). *PVsys: Software for PV systems analysis and simulation – User’s Guide* (Version 5.0). Université de Genève.
- [26] Johns, A. T. (2003). *ATPDraw user’s manual: Graphical preprocessor for ATP*. Norwegian University of Science and Technology (NTNU)
- [27] *El problema de la corriente inrush en transformadores* [PDF]. Recuperado de archivo local: [file:///C:/Users/DELL/Downloads/461-Article%20Text-832-1-10-20171230%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/DELL/Downloads/461-Article%20Text-832-1-10-20171230%20(2).pdf)
- [28] TE Connectivity. (s.f.). *Voltage Peak Switching versus Zero-Crossing Switching* [Nota de aplicación]. Recuperado de https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=srchtrv&DocNm=13C3206_AppNote&DocType=CS&DocLang=EN
- [29] Celduc Relais. (s.f.). *Practical application in relays and SSRs* [Nota técnica]. Recuperado de https://www.celduc-relais.com/wp-content/notes_techniques/SSR_Transfo_UK.pdf

ANEXOS

CATALOGO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO



MÓDULO MONOCRISTALINO MONOFACIAL



PRECAUCIÓN: LEA LAS INSTRUCCIONES DE SEGURIDAD E INSTALACIÓN ANTES DE UTILIZAR EL PRODUCTO.

© 2020 Trina Solar Limited. Todos los derechos reservados. Las especificaciones están sujetas a cambios sin previo aviso.
Version número: TSM_EN_2022_B www.trinasolar.com

Ilustración 65. Hoja técnica del módulo fotovoltaico monocristalino Vertex
fuente: Trina Solar. Ficha técnica del módulo monofacial Vertex



Improve 36V 50V LiFePO4 100ah 200ah 300ah Lithium Ion Phosphate Battery Pack for Solar Energy System/RV/Marine

US\$355.00
1 Piece (MOQ)

Port: Shenzhen, China
Production Capacity: 50000
Payment Terms: L/C, T/T, D/P, Western Union, Paypal

[Contact Now](#)

Shenzhen Improve Battery Co., Ltd.
Guangdong, China


Last Login Date:
Feb 04, 2025

Business Type:
Manufacturer/Factory, Trading Company

Main Products:
NiMH Battery, Lithium Polymer Battery, Lithium Battery, LiFePO4 Car Battery, LiFeP...

[More >](#)

*Ilustración 66. Batería de fosfato de hierro y litio de 36 V y 50 Ah, marca IMPROVE.
Fuente: Shenzhen Improve Battery Co., Ltd. Improve 36V 50V LiFePO₄ 100ah 200ah 300ah Lithium-Ion Phosphate Battery Pack*



High Voltage Solar Battery System MPPT Charger Controller 192V to 500V DC Solar Charge Controller

US\$1,200.00 - 5,000.00
1 Piece (MOQ)

Port: Ningbo, China
Production Capacity: 8888sets/Year
Payment Terms: T/T, Western Union, Paypal, Money Gram

[Contact Now](#)

Zhejiang Bangzhao Electric Co., Ltd.
Zhejiang, China

Last Login Date:
Jul 23, 2025

Business Type:
Manufacturer/Factory, Trading Company

Main Products:
Power Inverter, DC to AC Inverter, Voltage Converter, Battery Charger, Charger Cont...

[More >](#)

*Ilustración 67. Controlador MPPT de alta tensión con rango de entrada de 192 V a 500 V DC.
Fuente: Zhejiang Bangzhao Electric Co., Ltd. (2025). High Voltage Solar Battery System MPPT Charger Controller 192V to 500V DC*



Sol-Ark inversor híbrido residencial 15kW

[Ficha Técnica](#)

Inverter Model:	Limitless 15K-LV
SKU:	15K-2P
Input Data (PV)	
Max. Allowed PV Power (STC)	19,500W
Rated MPPT Operating Voltage Range	175 - 425V
MPPT Voltage Range	150 - 500V
Startup Voltage	125V
Max. DC Input Voltage ¹	500V
Max. Operating Input Current per MPPT	26A
Max. Short Circuit Current per MPPT	44A
No. of MPP Trackers	3
No. of PV Strings per MPPT	2
Max. AC Coupled Input	19,200W
Output Data (AC)	
Nominal AC Voltage	120/240V, 120/208V, 220V
Grid Frequency	50 / 60Hz
Real Power, max continuous	15,000W
Max. Output Current	62.5A
Real Power, max continuous (batteries only, no PV)	12,000W (50A @ 240V)
Peak Apparent Power (10s, off-grid)	24,000VA @ 240V
Peak Apparent Power (100ms, off-grid)	30,000VA @ 240V
Max Output Fault Current (5s)	94A with PV, 75A (batteries only)
Max Output Fault Current (100ms)	120A
Max. Grid Passthrough Current	200A
Power Factor Output Range	+/- 0.9 adjustable
Backup Transfer Time	5ms
CEC Efficiency	96.5%
Max Efficiency	97.5%
Design (DC to AC)	Transformerless DC
Stackable	Up to 12 in parallel
Battery Input Data (DC)	

Battery Input Data (DC)	
Battery Technologies	Lithium / Lead Acid
Nominal DC Voltage	48V
Operating Voltage Range	43 - 63V
Capacity	50 - 9900Ah
Max. Battery Charge / Discharge Current	275A
Battery Disconnecting Means	200A/pole x 2
Charging Controller	3-Stage with Equalization
Grid to Battery Charging Efficiency	96.0%
External Battery Temperature Sensor (BTS)	Included
Automatic Generator Start (AGS)	2 Wire Start - Integrated
BMS Communication	CANBus & RS485 MODBUS
General Data	
Dimensions (H x W x D)	807 x 494 x 306 mm (31.8 x 19.4 x 12 in)
Weight	61.2 Kg / 135 lb.
Enclosure	IP65 / NEMA 3R
Ambient Temperature	-25~55°C, > 45°C Derating
Noise	< 30 dB @ 25°C (77°F)
Idle Consumption - No Load	90W
Communication and Monitoring	Wi-Fi & LAN Hardware Included
Standard Warranty	10 Years

Ilustración 68. Inversor híbrido residencial Sol-Ark de 15 kW.

Fuente: Sol-Ark. (s.f.). Sol-Ark inversor híbrido residencial 15 kW. <https://www.sol-ark.com>



Ilustración 69. Transformador 15kVA

Fuente: Fuente: Fotografía del equipo del autor