UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAAGUAZÚ

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD

PROYECTO FINAL DE GRADO

PROPUESTA DE ESQUEMAS ANTE FALLAS DE SISTEMA DE CORRIENTE CONTINUA DE PROTECCIÓN Y CONTROL EN LA ESTACIÓN SANTA ROSA DE LA ANDE

AUTOR: LUIS RAFAEL AGUILERA SANCHEZ

TUTOR: PROF. ING. SEBASTIÁN ESPÍNOLA COLMÁN

CORONEL OVIEDO, JUNIO DE 2025

Usted es libre de:

- **Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato**
- **Adaptar — remezclar, transformar y construir a partir del material**

Bajo los siguientes términos:

- **Atribución — Usted debe dar crédito de manera adecuada, brindar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.**
- **NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con propósitos comerciales.**

DERECHO DE AUTOR

Quien/es suscribe/n, Luis Rafael Aguilera Sánchez, autor/a/autores del trabajo de investigación titulado **"PROPUESTA DE ESQUEMAS ANTE FALLAS DE SISTEMA DE CORRIENTE CONTINUA DE PROTECCIÓN Y CONTROL EN LA ESTACIÓN SANTA ROSA DE LA ANDE"**, declara/n que voluntariamente cede/n a título gratuito en forma pura y simple ilimitada e irrevocablemente a favor de la Facultad de Ciencias y Tecnologías – UNCA, el derecho de autor de contenido patrimonial, que le corresponde sobre el trabajo de referencia. Conforme a lo anteriormente expresado, esta sesión le otorga a la FCyT la Facultad de comunicar la obra divulgarla, publicarla y reproducirla en soportes analógicos o digitales en la oportunidad que así lo estime conveniente. La FCyT deberá indicar qué autoría o creación del trabajo corresponde a mi persona y hará referencia al autor y a las personas que hayan colaborado en la realización del presente trabajo de investigación.

En la ciudad de Coronel Oviedo a los …. , del mes de ……... del 2025

……

Firma/s

PÁGINA DE APROBACIÓN

Trabajo de fin de grado para la obtención del Título de Ingeniero Electricista, aprobado en representación de la Facultad Ciencias y Tecnología de la Universidad Nacional de Caaguazú, por el Tribunal Examinador constituido por los siguientes profesores y con la siguiente nota final:

CALIFICACIÓN FINAL: _____

ACTA N°:_____

FECHA :_____

Prof. Ing.

Prof. Ing.

Prof. Ing.

DEDICATORIA

A mis hijos, cuya luz y amor iluminan mi camino. Gracias por ser mi fuente de inspiración y motivación. Esta tesis es un regalo para ustedes, un testimonio de mi esfuerzo y dedicación para darles un futuro mejor.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, mis padres, a mi esposa e hijos gracias por ser parte de mi equipo, mi motivación y mi razón de ser.

RESUMEN

La estación eléctrica ES-SRO ubicada en el departamento de San Pedro, Paraguay, provee energía eléctrica a una amplia población. Sin embargo, un incendio ocurrido en sus instalaciones evidenció vulnerabilidades en su sistema de corriente continua (CC). Este incidente causó una interrupción prolongada del servicio eléctrico debido a una serie de fallas concatenadas, como problemas en el alimentador de 23 kV, fallas en el tablero de corriente continua (TDCC), y la inhabilitación de protecciones críticas, lo que resultó en un incendio masivo.

Mediante el análisis del esquema actual del sistema de CC en ES-SRO identificó varias deficiencias, incluyendo un único transformador de servicios auxiliares (SSAA) que presenta un punto único de falla, la falta de segregación de cargas en la barra del TDCC, y la limitada redundancia debido a un solo rectificador y banco de baterías. Estas debilidades comprometen la confiabilidad y la disponibilidad del sistema eléctrico, dejando en evidencia la necesidad de mejoras significativas para prevenir futuros incidentes.

Se propusieron cuatro esquemas para mejorar la disponibilidad del sistema de CC: el barraje seccionado con dos rectificadores, el uso de dos rectificadores en paralelo con bancos de baterías independientes, un rectificador con banco de baterías y sistema fotovoltaico con almacenamiento y un esquema de señalización de fallas. Resultando como mejor alternativa, el esquema de barraje seccionado con dos rectificadores con la incorporación de un sistema adicional de señalización de fallas mejora la confiabilidad y seguridad del sistema, permitiendo una detección temprana de problemas y una respuesta más rápida ante eventuales fallas. En total se necesitan 191.772.683 Gs. para implementar ambos esquemas.

Palabras clave: Innovación e Infraestructura, Distribución de Energía Eléctrica.

ABSTRACT

The ES-SRO power station located in the department of San Pedro, Paraguay, provides electricity to a large population. However, a fire at its facilities revealed serious vulnerabilities in its direct current (DC) system. This incident caused a prolonged power outage due to a series of concatenated failures, such as problems in the 23 kV feeder, failures in the DC switchboard (TDCC), and the disabling of critical protections, which resulted in a massive fire.

Through analysis of the current DC system layout at ES-SRO he identified several deficiencies, including a single auxiliary services transformer (SSAA) that presents a single point of failure, lack of load segregation at the TDCC bus, and limited redundancy due to a single rectifier and battery bank. These weaknesses compromise the reliability and availability of the power system, highlighting the need for significant improvements to prevent future incidents.

Four schemes were proposed to improve the availability of the DC system: the sectioned busbar with two rectifiers, the use of two rectifiers in parallel with independent battery banks, one rectifier with battery bank and photovoltaic system with storage and fault signaling. As a better alternative, the sectioned busbar scheme with two rectifiers with the incorporation of an additional fault signaling system improves the reliability and safety of the system, allowing an early detection of problems and a faster response to eventual failures. A total of 191,772,683 Gs. is required to implement both schemes.

Key words: Innovation and Infrastructure, Electric Power Distribution.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN 1

OBJETIVOS 2

Objetivo General 2

Objetivos Específicos 2

ANTECEDENTES 3

1. MARCO TEÓRICO 5

1.1. Sistemas auxiliares 5

1.1.1. Sistemas auxiliares en corriente alterna (CA) 5

1.1.2. Sistemas auxiliares en corriente continua (CC) [5] 5

1.1.2.1. Componentes de sistemas auxiliares en corriente continua 7

1.1.2.1.1. Rectificador AC/DC 7

1.1.2.1.2. Banco de Baterías 7

1.1.2.1.3. Interruptores de baja tensión CC 8

1.1.2.1.4. Diodo de Bloqueo 8

1.2. Esquemas ante fallas de sistema de corriente continua 9

1.2.1. Un solo cargador y banco de baterías con una barra de distribución [6] 9

1.2.2. Barraje de distribución seccionado con dos rectificadores [6] 10

1.2.2.1. Automatismo para barraje de distribución seccionado con dos rectificadores [7] 11

1.2.3. Dos rectificadores en paralelo y dos bancos de baterías [8] 13

1.2.4. Señalización de fallas en sistema de corriente continua [11] 16

2. METODOLOGÍA 17

2.1. Estación Santa Rosa 17

2.1.1. Ubicación 17

2.1.2. Descripción 17

2.1.3. Configuración de Servicios Auxiliares de corriente alterna (CA) 19

2.1.4. Configuración de Servicios Auxiliares de corriente continua (CC) 20

2.2. Causa de incendio de la ES-SRO 22

2.3. Esquema de corriente continua actual de la ES-SRO 23

2.3.1. Descripción del Esquema actual 25

2.3.2. Inconvenientes 25

2.4. Esquemas de sistemas de corriente continua de alta disponibilidad para la ES-SRO 26

2.4.1. Barraje de distribución seccionado con dos rectificadores 26

2.4.1.1. Descripción 26

2.4.1.2. Ventajas 28

2.4.1.3. Desventajas 28

2.4.2. Dos rectificadores en paralelo y dos bancos de baterías 28

2.4.2.1. Descripción 28

2.4.2.2. Ventajas 30

2.4.3.3. Desventajas 30

2.4.3. Señalización de fallas en sistema de corriente continua 31

2.4.3.1. Descripción 31

2.4.3.2. Ventajas 31

2.4.3.3. Desventajas 33

2.4.3.4. Relación con las alternativas anteriores: 33

2.4.4. Rectificador con banco de baterías y sistema fotovoltaico con almacenamiento. 33

2.4.4.1. Descripción 33

2.4.4.2. Ventajas 35
2.4.4.3. Desventajas 35
2.5. Presupuesto de las alternativas 36
2.5.1. Presupuesto de barraje de distribución seccionado con dos rectificadores 36
2.5.2. Presupuesto de dos rectificadores en paralelo y dos bancos de baterías 37
2.5.3. Presupuesto de rectificador con banco de baterías y sistema fotovoltaico con almacenamiento 38
2.5.4. Presupuesto de señalización de fallas en sistema de corriente continua 38
2.6. Comparación entre el esquema actual y los propuestos 40
2.7. Criterios para la selección de alternativa 41
2.7.1. Confiabilidad 41
2.7.2. Flexibilidad 41
2.7.3. Costo 41
2.7.4. Complejidad 42
2.7.5. Mantenimiento 42
2.7.6. Espacio físico 42
2.8. Selección de alternativas 43
2.8.1. Escala numérica 43
2.8.2. Selección de alternativa 45
RESULTADOS Y ANÁLISIS 49
CONCLUSIONES 51
RECOMENDACIONES 52
BIBLIOGRAFÍA 53
ANEXOS 1
ANEXO 1 1
A.1. Relevamiento de datos 1

A.1.1. Transformador de servicios auxiliares de la ES-SRO.....1

A.1.2. Diagrama del tablero de transferencia del generador.....2

A.1.3. Esquema de protecciones del tablero de sistemas auxiliares de corriente alterna.....3

ANEXO 2.....4

A.2. Sistema fotovoltaico.....4

ANEXO 3.....12

A.3. Características del rectificador presupuestado.....12

ANEXO 4.....14

A.4. Características del cuadro de Alarmas.....14

A.4.2. Cuadro de Alarmas seleccionado.....14

A.4.2.1. Descripción de funcionamiento.....15

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Fuentes de alimentación en DC [5]. 6
Figura 2. Sistema de c.c. con un cargador y banco de baterías con una barra de distribución [6]. 9
Figura 3. Sistema de c.c. con barraje seccionado y dos cargadores de baterías [6]. 11
Figura 4. Unifilar para esquema con doble transformador de SSAA, barraje de c.c. seccionado con dos rectificadores. 13
Figura 5. Sistema c.c. con doble rectificador y doble banco de baterías [8]. 16
Figura 6. Ubicación de la ES-SRO. 17
Figura 7. Mímico actual de la ES-SRO. 18
Figura 8. Unifilar del Tablero de Servicios Auxiliares de corriente alterna. 19
Figura 9. Tablero de Servicios Auxiliares de corriente alterna. 20
Figura 10. Unifilar Tablero de Servicios Auxiliares de corriente continua. 21
Figura 11.Tablero de Servicios Auxiliares de corriente continua. 22
Figura 12. Esquema de SSAA actual de la ES-SRO. 24
Figura 13. Esquema de barraje de distribución seccionado con dos rectificadores. 27
Figura 14. Esquema con dos rectificadores en paralelo y dos bancos de baterías. 29
Figura 15. Esquema de señalización de fallas en sistema de corriente continua. 32
Figura 16. Esquema con rectificador con banco de baterías y sistema fotovoltaico con almacenamiento. 34
Figura 17.Simbología utilizada en esquemas unifilares. 46
Figura 18. Unifilar de alternativas seleccionadas. 47
Figura 19. Modelo 2D del TDCC propuesto. 48
Figura 20. Único transformador de 200 kVA de servicios auxiliares de la ES-SRO. 2
Figura 21.Diagrama del tablero de transferencia del generador de 40 kVA de la ES-SRO. 2
Figura 22. Esquema de protecciones del tablero de sistemas auxiliares de corriente alterna. 3
Figura 23. Resumen de proyecto fotovoltaico. 5
Figura 24. Ubicación del proyecto fotovoltaico. 5

Figura 25. Parámetros generales del sistema fotovoltaico 6
Figura 26. Vista 3D del sistema fotovoltaico y recorrido solar. 7
Figura 27. Energía incidente, producción normalizada y factores de pérdida 8
Figura 28. Temperatura del conjunto y Diagrama entrada/salida diaria. 9
Figura 29. Energía diaria a la salida del sistema. 10
Figura 30. Dimensionamiento del voltaje del conjunto y distribución de salida del conjunto MPPT. 11
Figura 31. Anunciador de alarmas ANTRON II. 15
Figura 32. Diagrama de bloques del Cuadro de Alarmas. 16

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Presupuesto del esquema de barraje de distribución seccionado con dos rectificadores. 36
Tabla 2. Presupuesto del esquema dos rectificadores en paralelo y dos bancos de baterías. 37
Tabla 3. Presupuesto del esquema de rectificador con banco de baterías y sistema fotovoltaico con almacenamiento 38
Tabla 4. Presupuesto del esquema señalización de fallas en sistema de corriente continua. 39
Tabla 5. Comparativa del esquema actual y los esquemas propuestos. 40
Tabla 6. Escala numérica de cada criterio para la selección de las alternativas. 43
Tabla 7. Comparativa de alternativas utilizando los criterios seleccionados. 44
Tabla 8. Presupuesto para cada alternativa. 50

INTRODUCCIÓN

La energía eléctrica se ha vuelto primordial en nuestra sociedad actual, está presente en las actividades diarias de las personas, estas implican la electricidad para su uso en cualquier aparato o lugar.

El componente más crítico de un sistema de protección, control y supervisión es el sistema auxiliar de alimentación de control de corriente continua. Un fallo de la alimentación de control de CC puede hacer que los dispositivos de detección de fallos no puedan detectar fallos, que los interruptores no puedan dispararse por fallos, que la indicación local y remota quede inoperativa, etc.

Según el Departamento de Protecciones de la Administración Nacional de Electricidad (ANDE), en los últimos años se han registrado eventos significativos en las barras de 23 kV en diversas estaciones del Sistema Interconectado Nacional (S.I.N.), los cuales han resultado en interrupciones sustanciales y prolongadas del suministro eléctrico. Las causas principales de estos incidentes han estado relacionadas con fallas en los disparos de los interruptores de potencia, así como fallos en el sistema de corriente continua (Vcc). Uno de estos incidentes notables tuvo lugar en la Estación Santa Rosa de la ANDE.

Se debe tener un sistema de corriente continua de alta disponibilidad que nos permita realizar maniobras aún en la condición más adversa. De ahí la importancia de contar con una investigación que nos permita conocer el tipo de riesgos que son latentes en el sistema de potencia, así como las precauciones para proteger y prever los equipos y al personal, que es algo que en cualquier sistema eléctrico de potencia debe tomarse en cuenta. El conocer y establecer un buen sistema de esquemas ante fallas nos permitirá impedir que el sistema de potencia se incendie y que el fuego se propague a otros equipos e instalación y de esta forma poner en riesgo al personal y al capital de la ANDE.

OBJETIVOS

Objetivo General

- Proponer esquemas ante fallas de sistemas auxiliares de corriente continua en la Estación Santa Rosa de la ANDE.

Objetivos Específicos

- Analizar la causa de incendio y el esquema de sistemas auxiliares actual de la ES-SRO.
- Determinar los esquemas de protección y alimentación de los equipamientos del sistema de corriente continua que nos permita mejorar la confiabilidad y seguridad.
- Elaborar esquemas de sistemas auxiliares de corriente continua de alta disponibilidad.
- Realizar un presupuesto de las alternativas.
- Realizar el análisis comparativo de los esquemas propuestos.

ANTECEDENTES

Jorge Efraín Cadena Rodríguez en su trabajo del año 1978 **"Requerimientos de servicios auxiliares de una subestación"** [1] propuso como objetivo principal el estudio de los servicios auxiliares requeridos en una subestación transformadora, la selección de un esquema conveniente para la alimentación de dichos servicios, y la provisión de una protección adecuada para el normal y óptimo funcionamiento de los mismos. Identificó las posibles fallas de servicios auxiliares, explicando las causas, las consecuencias y lo que puede hacerse para mejorar la confiabilidad. Se trató individualmente la protección de alterna y de continua.
Posteriormente se procedió a aplicar todo el estudio en la subestación de la Vicentina de Ecuador, contemplando los cálculos de los circuitos y esquemas de alimentación de los servicios auxiliares en CC y CA.

Roberto Mercado Giménez en su proyecto del año 2021 **"DISEÑO DE UNA FUENTE DE ALIMENTACIÓN SEGURA Y EFICIENTE PARA LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN Y CONTROL DE LAS ESTACIONES Y SUBESTACIONES DEL SISTEMA CENTRO DE LA ANDE"** [2] diseñó una fuente segura y eficiente para la alimentación en 110 Vcc de los sistemas de protección y control de las Estaciones y Subestaciones del Sistema Centro de la ANDE con el objeto de aumentar la confiabilidad de dichos sistemas.
Mediante la implementación de la solución propuesta se lograría un sistema totalmente redundante, dada la incorporación automática de un sistema fotovoltaico, con lo cual se podrá abastecer las exigencias energéticas requeridas en caso de la perdida de la alimentación principal. Además, se propone la actualización de las protecciones de los elementos más importantes del sistema de Servicios Auxiliares. Según su análisis financiero el proyecto resulta viable para un periodo de tiempo mayor a 10 años.

Michael Thompson y **David Wilson**, en su artículo técnico **"Auxiliary DC Control Power System Design for Substations"** [3] presentado en la Conferencia Anual de Relés de Protección de Georgia Tech en 2007, analiza el diseño de sistemas de alimentación auxiliar de CC para subestaciones eléctricas. Se centra en la importancia de la fiabilidad del sistema de baterías, incluyendo el dimensionamiento adecuado, el mantenimiento y las consideraciones de seguridad, como la ventilación para prevenir la acumulación de hidrógeno. Se comparan diferentes tipos de baterías (VRLA, VLA, N-C, RN-C) considerando su fiabilidad, costos y requisitos de mantenimiento. Finalmente, se discuten aspectos del diseño del sistema de protección y control, incluyendo la disposición de los circuitos de CC para minimizar los puntos únicos de fallo y mejorar la redundancia.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Sistemas auxiliares

Se entiende por sistemas auxiliares al conjunto de instalaciones formadas por las fuentes de alimentación de corriente directa y de corriente alterna, de baja tensión. que se utilizan para energizar los sistemas de control, protección, señalización, alarmas y alumbrado de una estación, así como el sistema contra incendio [4].

1.1.1. Sistemas auxiliares en corriente alterna (CA)

Los elementos que requieren una alimentación en corriente alterna los podemos dividir en:

Servicios para equipos principales. Cambiador de derivaciones en un banco de transformadores, calefacción, motores de accionamiento para los interruptores de potencia y para los seccionadores, bobinas de cierre y de disparo, puente grúa, compresores de aire para interruptores, ventiladores de enfriamiento el equipo de excitación, ventiladores de enfriamiento para transformadores, equipo contra incendio.

Sistemas de iluminación. Iluminación en la casa de control, áreas exteriores y accesos.

Caseta de control. Calefacción, ventilación, aire acondicionado, entrada al cargador de baterías, bomba de agua.

1.1.2. Sistemas auxiliares en corriente continua (CC) [5]

En una central generadora o estación, las cargas que requieren corriente continua se alimentan normalmente de un cargador de baterías cuya entrada está permanentemente conectada a la fuente principal de los servicios auxiliares (AC), y su salida alimenta un barraje al que se conectan las cargas en corriente continua de baja tensión (Figura 1). El cargador de baterías, además de alimentar normalmente las cargas DC mantiene el banco de baterías cargado, con el fin de que se puedan suplir las necesidades de corriente continua cuando el cargador no pueda hacerlo, bien sea en caso de falla o de sobrecarga, en la que se requiere apoyo de las baterías.

En el diagrama de la Figura 1 se muestra también un inversor, cuya función es convertir una señal de tensión DC en una AC; mediante éste se toma tensión continua de la barra

de DC y se obtiene tensión alterna, con la que se alimenta un tablero de servicios esenciales, los cuales (como su nombre lo indica) siempre deben tener una alimentación ininterrumpida; de lo contrario, se causarían graves traumatismos al sistema. Esta alimentación es realmente una alimentación de emergencia para tales servicios, ya que normalmente deben ser alimentados desde una fuente de AC.

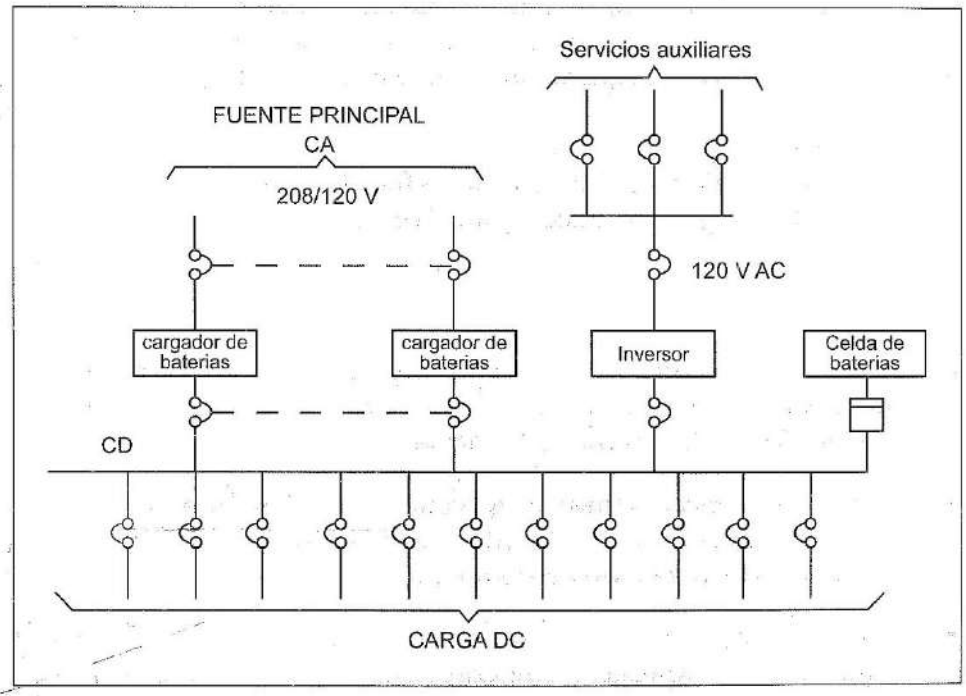


Figura 1. Fuentes de alimentación en DC [5].

Es necesario tener en cuenta que algunos de los equipos que forman parte de los servicios auxiliares en una subestación pueden ser alimentados, según sus características de fabricación, con corriente AC, DC, o con ambas. Los equipos más comunes en una subestación que requieren ser alimentados con corriente DC son bobinas de apertura y cierre de los interruptores, motores de accionamiento de seccionadores e interruptores, relés de protección, equipos de registro de fallas, inversores, alumbrado de emergencia (en algunos casos), bancos de baterías, equipos de comunicaciones.

1.1.2.1. Componentes de sistemas auxiliares en corriente continua

1.1.2.1.1. Rectificador AC/DC

Los rectificadores son dispositivos fundamentales en la conversión de corriente alterna (CA) a corriente continua (CC), lo que los hace esenciales para la carga y mantenimiento de baterías, especialmente en sistemas auxiliares.

1.1.2.1.2. Banco de Baterías

Los bancos de baterías son componentes críticos en las estaciones eléctricas, especialmente en sistemas auxiliares de corriente continua (CC). Estos sistemas están diseñados para proporcionar energía de respaldo, asegurando el funcionamiento continuo de equipos esenciales durante interrupciones en el suministro eléctrico.
Seguidamente se describe dos tipos de baterías utilizadas generalmente en bancos por la ANDE:

1.1.2.1.2.1. Baterías de Ni-Cd

Las baterías de níquel-cadmio (Ni-Cd) son un tipo de batería recargable que utiliza óxido de níquel y cadmio como materiales activos. Inventadas a finales del siglo XIX, estas baterías han sido ampliamente utilizadas en diversas aplicaciones, desde dispositivos portátiles hasta herramientas industriales y aeronáuticas.
Las baterías Ni-Cd son conocidas por su alta durabilidad y resistencia a ciclos repetidos de carga y descarga. Pueden operar eficientemente en condiciones extremas de temperatura, lo que las hace ideales para aplicaciones donde se requiere fiabilidad bajo estrés ambiental. Además, son capaces de proporcionar picos altos de corriente, lo que resulta útil en herramientas eléctricas y dispositivos que demandan energía instantánea.
Sin embargo, las baterías Ni-Cd presentan desventajas significativas. Uno de los problemas más notorios es el efecto memoria, que puede reducir la capacidad utilizable si no se descargan completamente antes de recargarlas. Además, el cadmio es un metal pesado tóxico, lo que plantea preocupaciones ambientales sobre su manejo y reciclaje.

1.1.2.1.2.2. Baterías Plomo-ácido

Las baterías de plomo-ácido son un tipo de batería recargable ampliamente utilizado en diversas aplicaciones, desde automóviles, estaciones eléctricas móviles, hasta sistemas de energía solar. Su funcionamiento se basa en reacciones químicas entre plomo y óxido de plomo en un electrolito de ácido sulfúrico.

Cada batería de plomo-ácido está compuesta por varias celdas interconectadas, cada una de las cuales contiene un electrodo positivo hecho de óxido de plomo (PbO_2) y un electrodo negativo de plomo esponjoso. Estos electrodos están sumergidos en una solución de ácido sulfúrico, que actúa como electrolito. Cuando la batería se descarga, los electrones fluyen espontáneamente del electrodo negativo al positivo, generando corriente eléctrica. Al recargar la batería, se invierte este proceso, restaurando los electrodos a su estado original.

1.1.2.1.3. Interruptores de baja tensión CC

Los interruptores de baja tensión para corriente continua (CC) son dispositivos esenciales en sistemas eléctricos, especialmente en aplicaciones donde se requiere la protección de circuitos contra cortocircuitos y sobrecargas. Estos interruptores están diseñados para manejar voltajes nominales inferiores a 1500 V en CC.

1.1.2.1.4. Diodo de Bloqueo

Permite la conexión en paralelo de varios equipos con iguales características técnicas, de tal manera que aseguran el funcionamiento continuo de la carga con un grado de confiabilidad mayor. Esta conexión permite hacer un mantenimiento preventivo a cualquiera de las unidades sin necesidad de dejar de suministrar energía a la carga conectada.

1.2. Esquemas ante fallas de sistema de corriente continua

1.2.1. Un solo cargador y banco de baterías con una barra de distribución [6]

Este esquema es el más sencillo, ya que consta de un solo cargador de baterías, un banco de baterías como respaldo y una barra de distribución para suministrar energía a los diferentes circuitos. El cargador se conecta a un circuito de corriente alterna, ya sea trifásica (por ejemplo, 380 Vca) o monofásica (por ejemplo, 220 Vca). Esta configuración es común en estaciones de importancia moderada dentro del sistema, que utilizan esquemas simples de alimentación de corriente alterna. Este esquema se ilustra en la Figura 2.

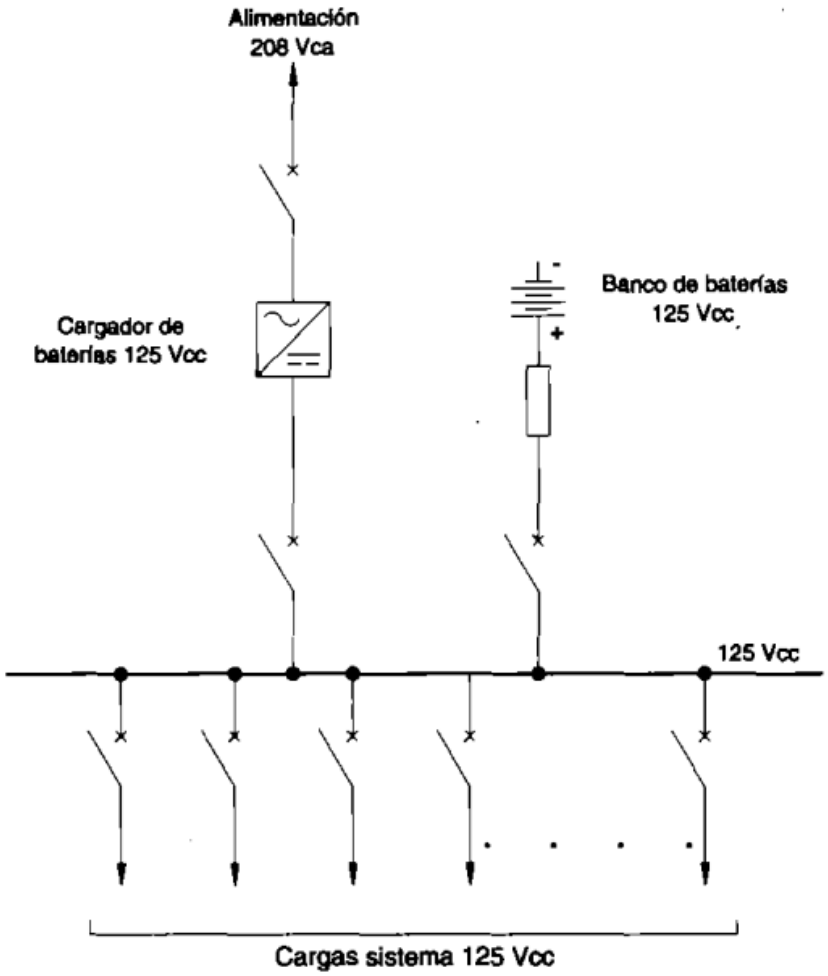


Figura 2. Sistema de c.c. con un cargador y banco de baterías con una barra de distribución [6].

1.2.2. Barraje de distribución seccionado con dos rectificadores [6]

Una opción que proporciona una alta confiabilidad al sistema es la adición de un segundo rectificador y el seccionamiento de la barra de distribución de corriente continua. Este esquema presenta costos de implementación reducidos, lo que lo hace atractivo por su simplicidad, flexibilidad e independencia entre las casetas de control en sistemas distribuidos.

Este diseño permite la distribución de cargas en ambas barras, buscando redundancia en la fuente; por ejemplo, se puede alimentar la protección principal en una barra y la protección de respaldo en la otra, o utilizar bobinas de disparo en diferentes barras. En esta configuración, ambos rectificadores de baterías están alimentados de manera independiente, es decir, cada rectificador recibe energía de un circuito que puede provenir de una barra de corriente alterna diferente o de la misma barra. Esta disposición ofrece una buena disponibilidad y flexibilidad al sistema.

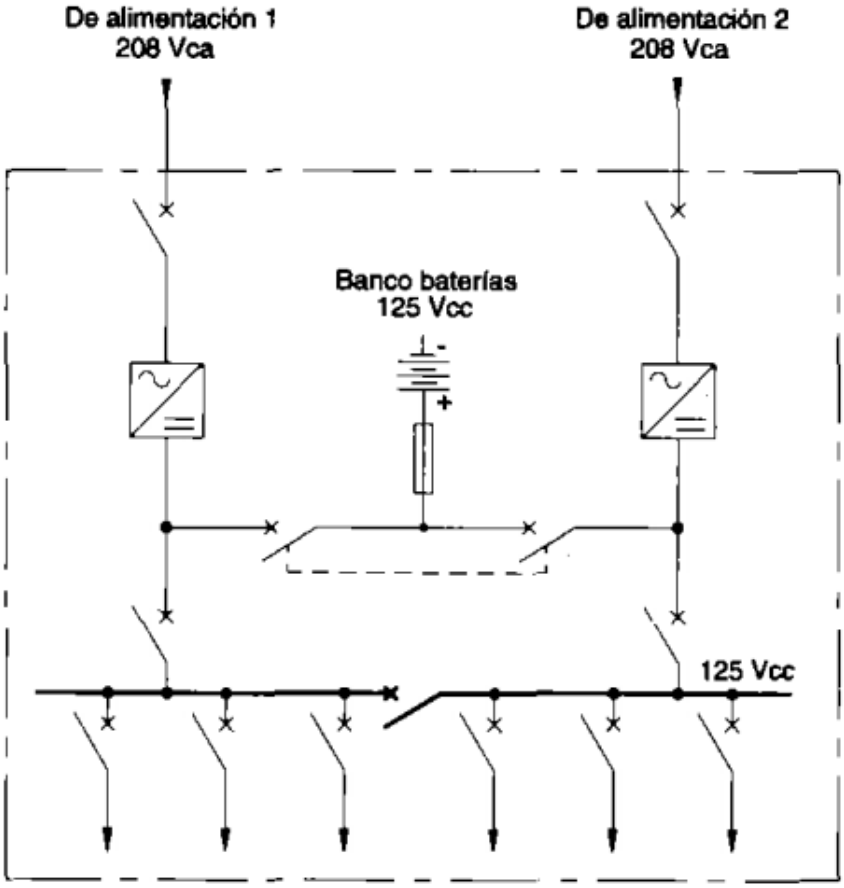


Figura 3. Sistema de c.c. con barraje seccionado y dos cargadores de baterías [6].

1.2.2.1. Automatismo para barraje de distribución seccionado con dos rectificadores [7]

En el esquema de la Figura 4 presentado por [7] los dos rectificadores alimentan a un cuadro de distribución de 110 V c.c., de tipo compartimentado, con dos juegos de barras (1 y 2).

Entre los dos juegos de barras existe la posibilidad de apoyo mutuo, por medio de un interruptor motorizado de enlace de barras controlado por un automatismo programado en la unidad de control de SSAA que también controla la conmutación en el cuadro de corriente alterna.

En el caso de apoyo entre barras, el rectificador es capaz de cargar la batería mientras atiende los consumos permanentes de las dos barras. Así pues, se consideran como cargas permanentes no solo las de la propia barra, sino también las correspondientes a

los circuitos que habitualmente son alimentados por la batería que estuviese fuera de servicio.

Así, el cuadro de SSAA 110 Vc.c. tiene, una configuración de simple barra partida, estando cada tramo de barras alimentado desde un rectificador. Las acometidas desde cada rectificador batería a su semibarra se realizan por medio de un interruptor motorizado. Con las siguientes denominaciones:

- 72-1: Interruptor de acometida desde rectificador batería 1.
- 72-2: Interruptor de acometida desde rectificador batería 2.
- 72-3: Interruptor de enlace de barras.

Los tres elementos anteriores estarán motorizados y gobernados por la unidad de control de SSAA para la conmutación automática, de forma que en funcionamiento normal la explotación sea en barra partida, pero ante la pérdida de cualquiera de los dos sistemas de 110 V c.c. el otro asuma todo el servicio mediante el cierre del interruptor 72-3 y posterior apertura del de acometida correspondiente al sistema fallado.

Al restablecerse el servicio, la unidad de control da orden de cierre al interruptor correspondiente (72-1 y 72-2) y posteriormente de apertura al de partición de barras. De esta forma, durante la conmutación no se pasa por un cero en ninguna semibarra.

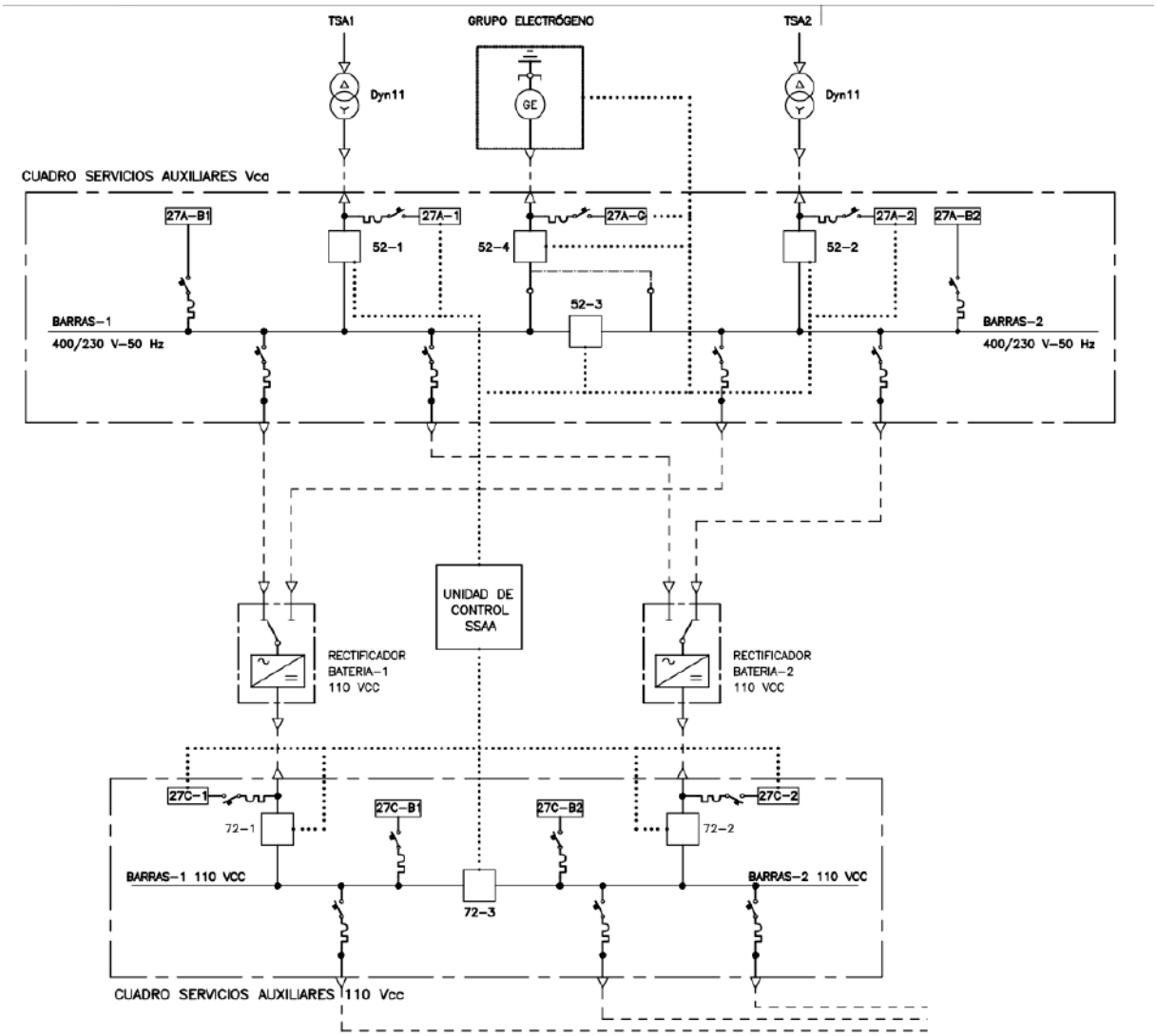


Figura 4. Unifilar para esquema con doble transformador de SSAA, barraje de c.c. seccionado con dos rectificadores.

1.2.3. Dos rectificadores en paralelo y dos bancos de baterías [8]

En muchas estaciones se instalan dos rectificadores junto con dos bancos de baterías, lo que refuerza la robustez del sistema. Sin embargo, con el tiempo, los problemas tienden a duplicarse. Los rectificadores de tiristores tienen una vida útil de 20 a 25 años [9], aunque pueden durar más gracias a que las baterías amortiguan su funcionamiento. Algunos clientes implementan anillado en los circuitos de corriente continua, dividiendo las barras de distribución y alimentando las cargas de varias casetas desde un mismo

rectificador. Esto asegura que todos los cargadores y bancos mantengan el mismo nivel de tensión, aunque también puede llevar a que un banco defectuoso afecte a los demás.

Para mitigar este riesgo, se utilizan contraceldas, que son puentes de diodos instalados en la entrada de los rectificadores, permitiendo que la carga fluya en una sola dirección. Además, los bloqueos electrónicos ayudan a prevenir fallas graves, como cortocircuitos a tierra, que podrían hacer que el sistema se vuelva inestable. Este esquema está diseñado con dos rectificadores y dos bancos de baterías, uno para cada rectificador.

1.2.3.1. Desventajas

Para que sean totalmente redundantes, cada batería debe tener un tamaño que satisfaga el ciclo de trabajo del perfil de carga de toda la estación [10].
Los sistemas DC auxiliares duales abordan los siguientes riesgos:
- Falta de suministro de corriente de disparo debido a la alta impedancia interna de una celda.
- Fallo en el suministro de corriente de disparo debido a conexiones deficientes en el circuito.
- Un cortocircuito en los cables de la batería o en el bus de CC desconecta uno de los sistemas auxiliares de CC.
- Aparece una sobretensión en un sistema de c.c. que provoca el fallo de varios sistemas de protección primarios y auxiliares.
- Se produce un fallo en el cargador de baterías cuya reparación lleva más tiempo que los criterios de diseño del tamaño de las baterías.
- Se produce un fallo del cargador de baterías y la capacidad de su batería asociada se ha deteriorado, debido al envejecimiento, hasta el punto de que falla antes del tiempo permitido para la reparación del cargador de baterías.
- El fallo del cargador de baterías se produce cuando la batería ya está descargada y no queda suficiente tiempo de funcionamiento para la reparación del cargador de baterías.
Cuando se utilizan baterías dobles, es conveniente proporcionar algún medio para conectar los dos sistemas. Las conexiones cruzadas pueden ser beneficiosas porque facilitan el mantenimiento y las pruebas. También proporcionan flexibilidad de conmutación para responder a un fallo [10]. Cuando se prevea la conexión en paralelo

de los dos buses de alimentación de CC, el personal de mantenimiento y operaciones siempre debe tener cuidado al conectar en paralelo dos bancos de baterías. La conexión en paralelo de bancos de baterías con estados de carga y niveles de tensión en bornes significativamente diferentes puede provocar transitorios en el sistema de alimentación de control de CC auxiliar.

Los requisitos de mantenimiento y comprobación también deben tenerse en cuenta al diseñar la instalación de la batería. La referencia [10] recomienda la instalación de un disyuntor de prueba y una caja de bornes dedicados para proporcionar una ubicación conveniente para conectar un banco de carga de descarga.

Si se instalan baterías dobles, se recomienda incluir medios para aislar cada batería, además de medios para unir los dos buses de alimentación de CC. De esta forma, se puede aislar una batería durante una prueba de capacidad, mientras que la otra batería está disponible para alimentar las cargas de disparo durante las pruebas.

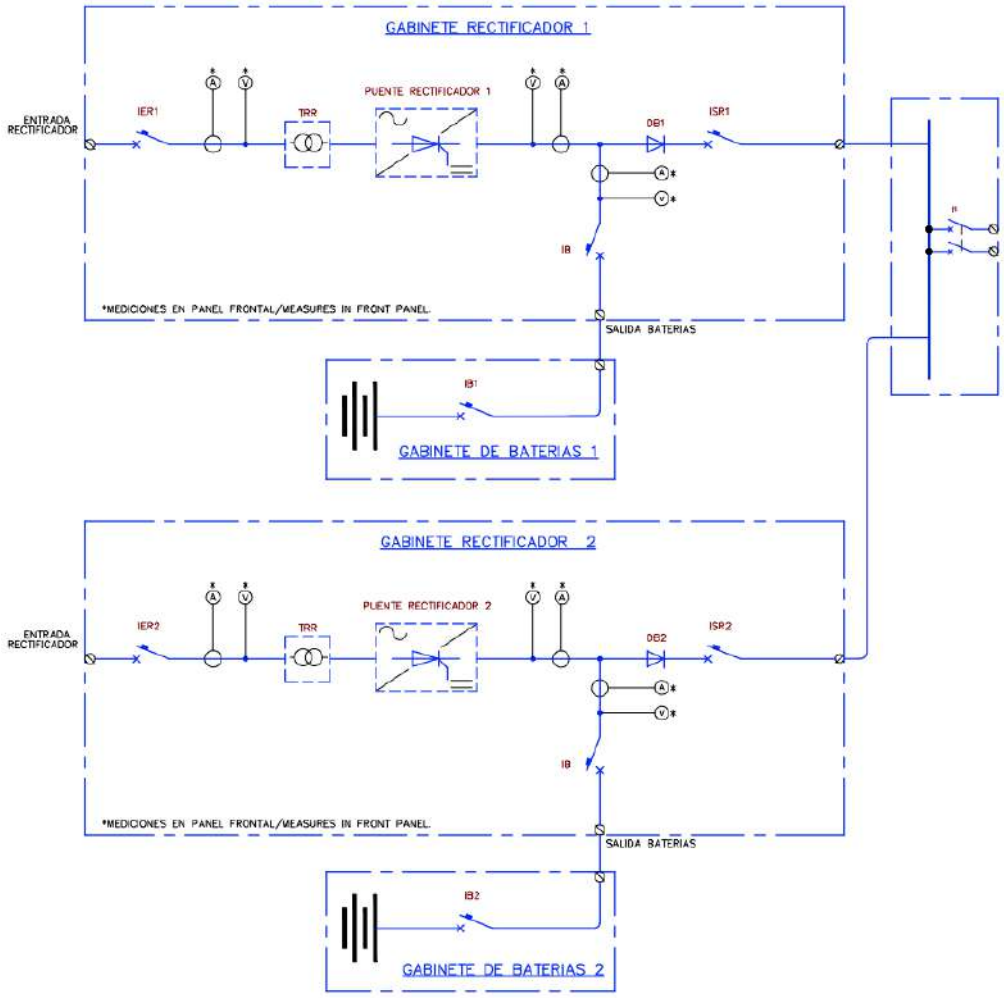


Figura 5. Sistema c.c. con doble rectificador y doble banco de baterías [8].

1.2.4. Señalización de fallas en sistema de corriente continua [11]

En el esquema propuesto por [11], se recomienda utilizar interruptores automáticos termomagnéticos MCB (Miniature Circuit Breaker) o MCCB (Moulded Case Circuit Breaker) específicos para corriente continua de acuerdo con la norma IEC 60947-2 , que regula los interruptores automáticos para aplicaciones industriales en instalaciones de hasta 1.000 voltios de corriente alterna o 1.500 voltios de corriente continua. Todos los interruptores automáticos deben disponer de un contacto auxiliar Normalmente Abierto (NA) y Normalmente Cerrado (NC) para que, en caso de que actúen, puedan ser señalizados en el panel de alarma de la estación.

2. METODOLOGÍA

2.1. Estación Santa Rosa

2.1.1. Ubicación

La Estación Santa Rosa (ES-SRO) de la ANDE se ubica en el distrito de Santa Rosa del Aguaray sobre la ruta PY-11 en el noreste del departamento de San Pedro, Paraguay. Pertenece al sistema central de la ANDE (el sistema central abarca los Departamentos de San Pedro, Guairá, Caaguazú y Caazapá son atendidos por el Sistema de Distribución Regional Centro), abastece de energía eléctrica a unos 12.500 usuarios de las localidades de San Pedro del Ycuamandiyu, Correa Rugua, Escalera, Barbero, Antequera, Poroto, San Pablo Cocuere, Potrero Naranjo y alrededores.

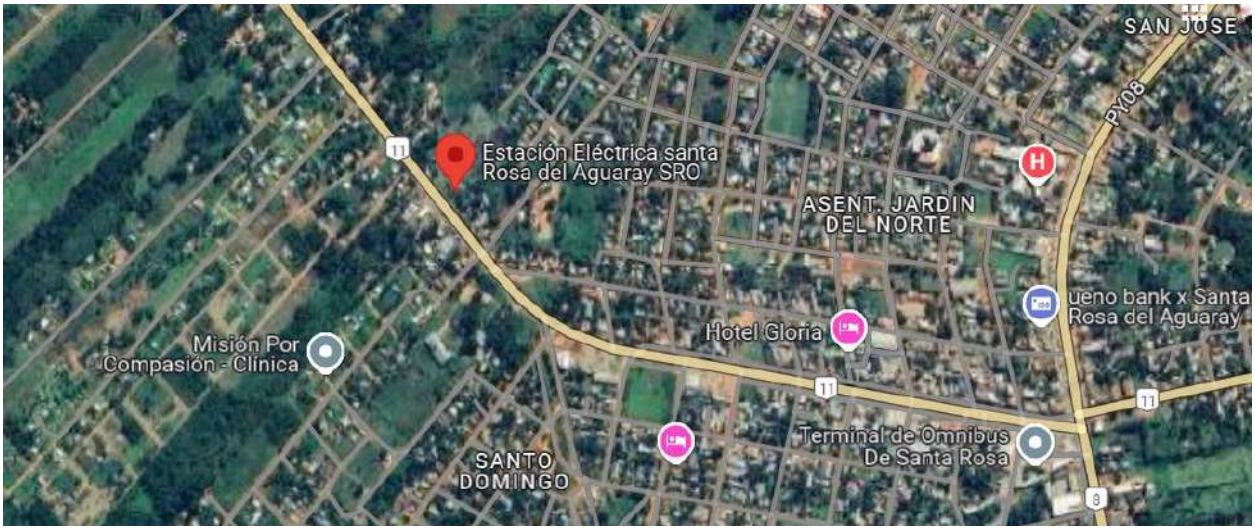


Figura 6. Ubicación de la ES-SRO.

2.1.2. Descripción

Cuenta con una barra de 220 kV que alimenta dos siguientes transformadores de potencia:

- TR-1 de 3x20 MVA (220kV/66kV) de la marca NARI.
- TR-3 de 41,6 MVA (220kV/23kV) de la marca TOSHIBA.

Presenta una configuración de barras a nivel de 220 kV del tipo barra principal con barra de transferencia y en el patio de 66 kV posee una salida simple.

La barra de 23 kV suministra energía a 7 alimentadores, un transformador de SSAA de 200 kVA y cuenta con un banco de compensación reactiva de 3 MVAr.

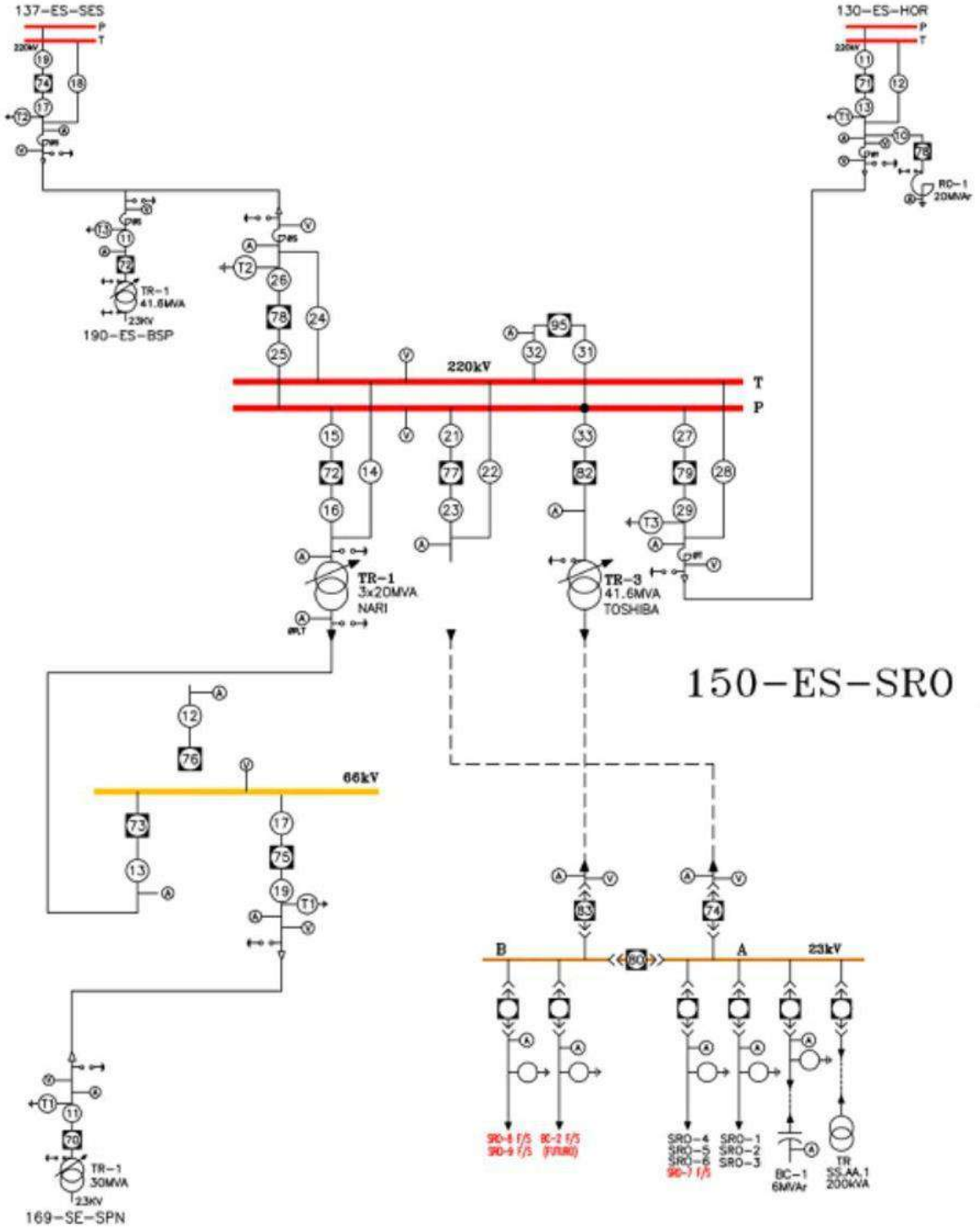


Figura 7. Mímico actual de la ES-SRO.

2.1.3. Configuración de Servicios Auxiliares de corriente alterna (CA)

El tablero de distribución de Servicios Auxiliares (SSAA) de corriente alterna (TDCA) de la Figura 9 es alimentada por medio de un transformador de media tensión de 200 kVA. Dicho tablero alimenta las siguientes cargas:

- Iluminación y toma (Patio).
- Iluminación y toma (Casa de Control).
- Rectificador 110 Vcc.
- Ventilador TR-1.
- Ventilador TR-2.
- Rectificador 48 Vcc.
- Servicios para equipos principales.

La protección general termomagnética del tablero es de tipo caja moldeada (MCCB) tripolar 3x200A. Los circuitos derivados de la barra son del tipo MCB.

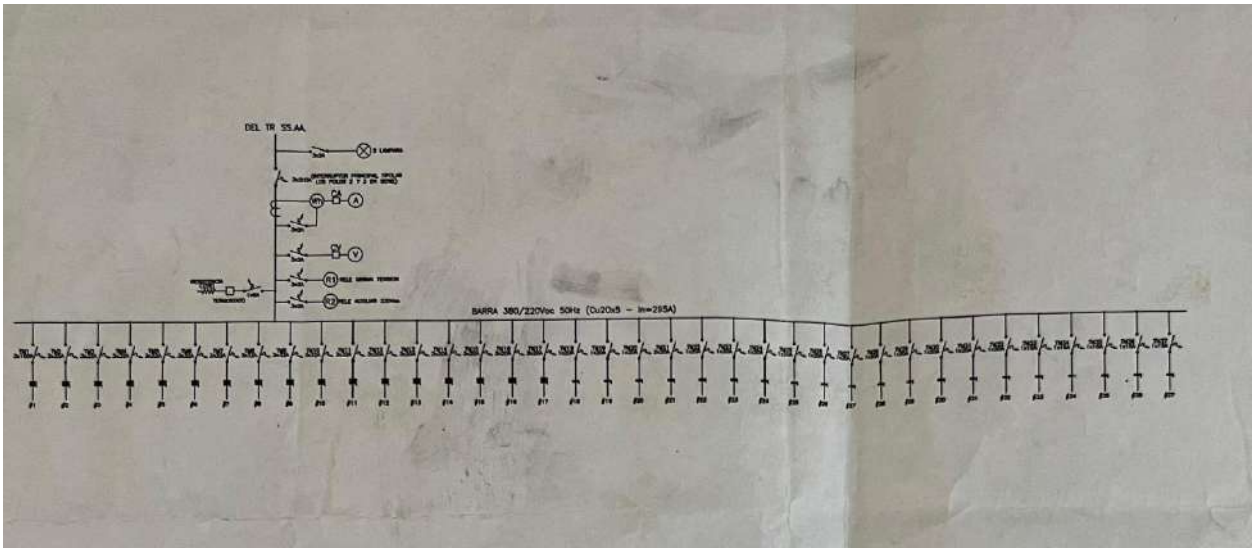


Figura 8. Unifilar del Tablero de Servicios Auxiliares de corriente alterna.

La Estación cuenta además con un Grupo Generador de Emergencia de 40 kVA que opera como respaldo para la alimentación de corriente alterna al local.

Figura 9. Tablero de Servicios Auxiliares de corriente alterna.

2.1.4. Configuración de Servicios Auxiliares de corriente continua (CC)

El tablero de distribución de corriente continua (TDCC) de la Figura 11 recibe alimentación de un único rectificador de 110 voltios en corriente continua (Vcc), encargado de suministrar energía a los principales circuitos, tales como los de control y protección, relés de protección, circuitos de mando, bobinas de disparo de los interruptores y motores de accionamiento de los seccionadores de potencia, entre otros. Además, este mismo rectificador se ocupa de mantener la carga de las baterías, las cuales actúan como respaldo del sistema en caso de fallas en el rectificador.

La protección del rectificador es del tipo caja moldeada de 3x200A.

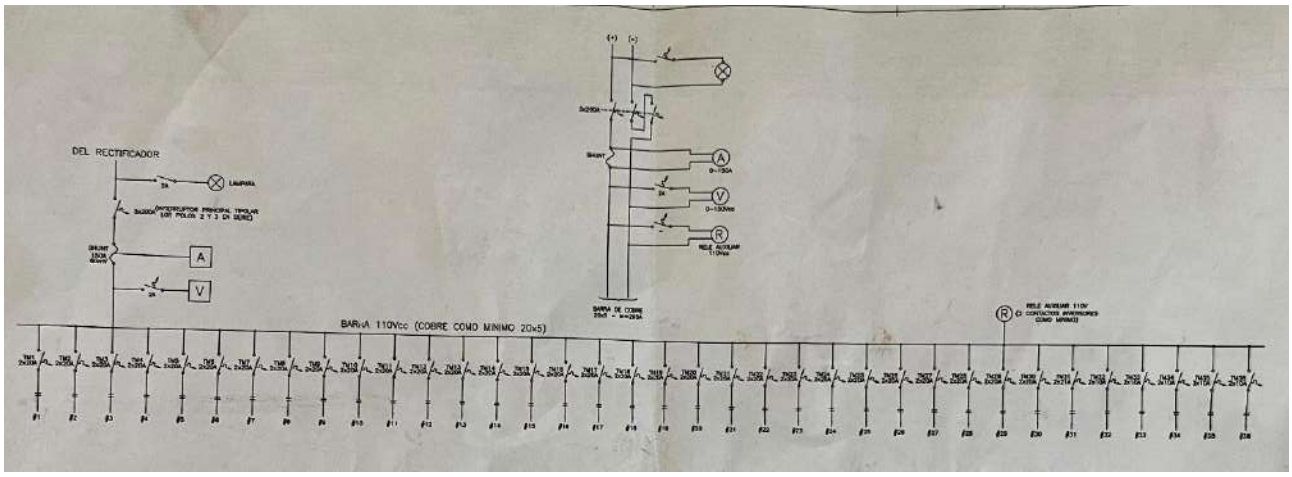


Figura 10. Unifilar Tablero de Servicios Auxiliares de corriente continua.

El local está equipado con un banco de baterías de tipo níquel-cadmio (Ni-Cd), con una capacidad de 305 Ah y una autonomía estimada de 5 a 10 horas al suministrar energía a la totalidad de las cargas.

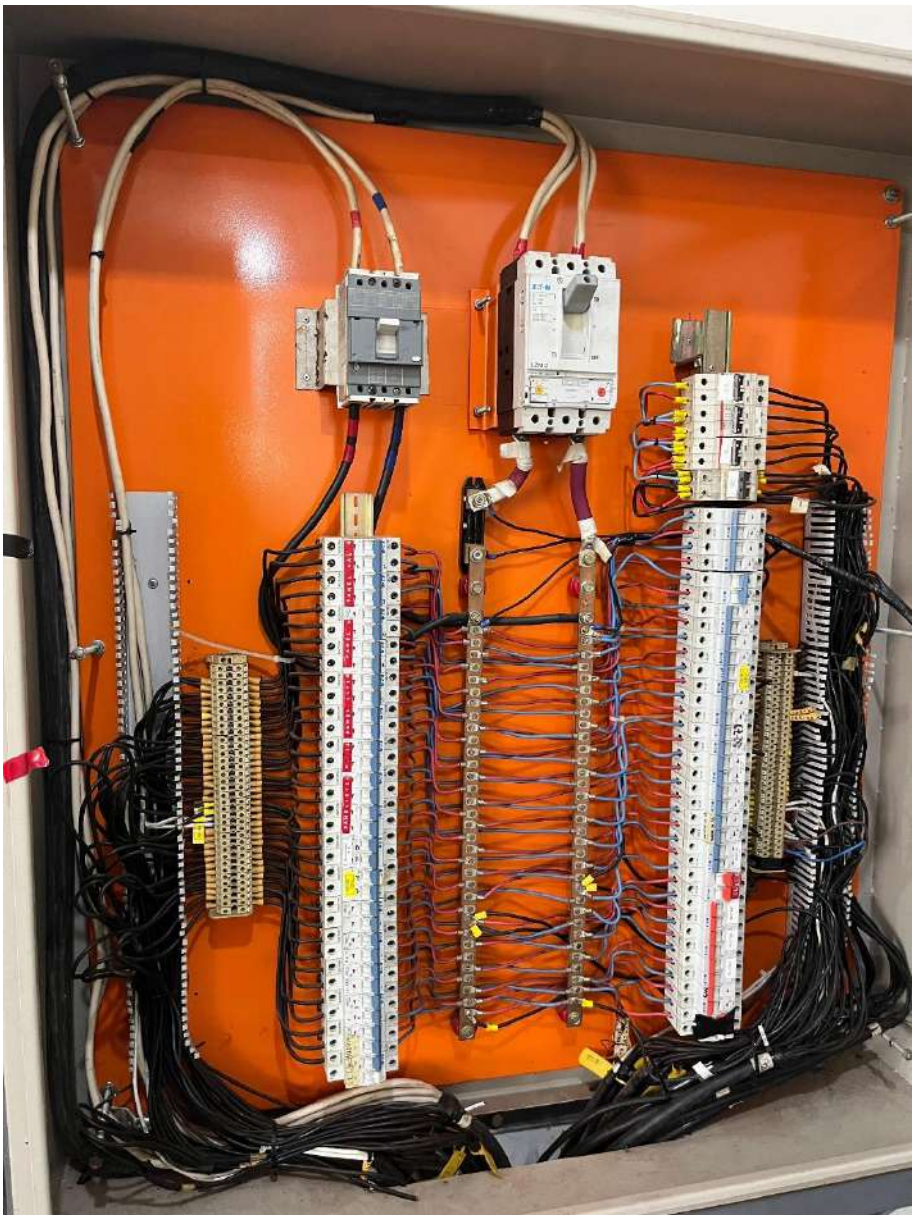


Figura 11.Tablero de Servicios Auxiliares de corriente continua.

2.2. Causa de incendio de la ES-SRO

El incendio en la Estación Santa Rosa (ES-SRO) no fue producto de un único evento, sino una desafortunada concatenación de fallas que llevaron a la pérdida de control de la situación. La descripción de los eventos que desencadenaron el incendio se puede resumir en los siguientes puntos [12]:

• **Falla inicial en un alimentador de 23 kV:** Este evento, cuya naturaleza no se detalla en las fuentes, fue el detonante de la cascada de problemas que condujeron al incendio.

• **Operación de las protecciones y apertura del interruptor:** Las protecciones del sistema detectaron la falla en el alimentador y actuaron correctamente abriendo el interruptor asociado para aislar la falla.

• **Falla en el TDCC durante el recierre:** Al intentar restablecer el servicio mediante un recierre automático, se produjo una falla en el Tablero de Corriente Continua (TDCC).

• **Pérdida de corriente continua en la barra de 23 kV:** La falla en el TDCC provocó la operación de la termomagnética que alimentaba la barra de 23 kV, dejándola sin corriente continua.

• **Falla del respaldo de la protección 50/51:** Ante la falta de corriente continua en la barra de 23 kV, la protección 50/51 del lado de 220 kV debía actuar como respaldo. Sin embargo, el auxiliar de disparo de esta protección estaba dañado, impidiendo su correcta operación.

• **Incendio masivo:** La incapacidad para despejar la falla, debido a la falta de corriente continua y la falla en la protección de respaldo, provocó que la situación se saliera de control, culminando en un incendio masivo en la Estación Santa Rosa.

Este evento destaca la importancia crucial de la redundancia y el mantenimiento adecuado de los sistemas de protección y de corriente continua en las estaciones eléctricas para prevenir eventos catastróficos como el incendio de la ES-SRO.

2.3. Esquema de corriente continua actual de la ES-SRO

El esquema actual de corriente continua de la ES-SRO se muestra en la Figura 12, se caracteriza por su simplicidad y falta de redundancia, lo que lo hace vulnerable a fallas como la que desencadenó el incendio.

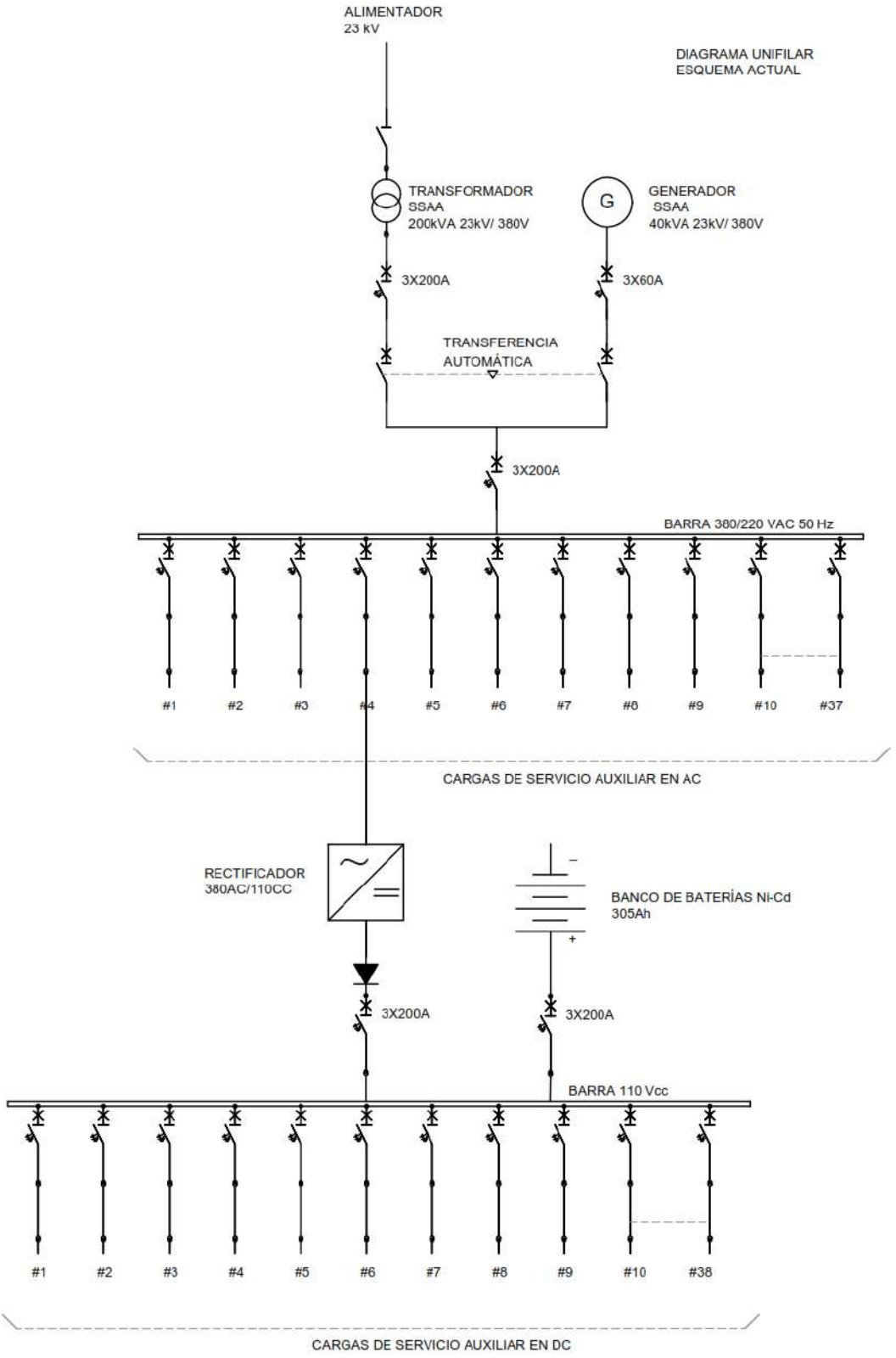


Figura 12. Esquema de SSAA actual de la ES-SRO.

2.3.1. Descripción del Esquema actual

• Un único transformador alimenta el Tablero de Distribución de Corriente Alterna (TDAC).
• El Tablero de Distribución de Corriente Alterna cuenta con una sola barra de distribución que alimenta al rectificador, no se tiene una segregación de cargas esenciales y no esenciales en dicha barra.
• Un único rectificador de 110 Vcc alimenta el Tablero de Distribución de Corriente Continua (TDCC) conformada por una sola barra.
• Este rectificador se encarga de alimentar los circuitos de control y protección, relés, bobinas de disparo, motores de accionamiento, entre otros.
• Además de alimentar las cargas, el rectificador mantiene cargado un único banco de baterías de níquel-cadmio (Ni-Cd) de 305 Ah.
• Estas baterías proporcionan una autonomía de entre 5 y 10 horas en caso de falla del rectificador.

2.3.2. Inconvenientes

El esquema actual presenta diversos inconvenientes que lo hacen poco confiable y susceptible a fallas que pueden comprometer la operación de la estación. Estos inconvenientes son:
• Un solo transformador de Servicios Auxiliares (SSAA): Una falla en este transformador dejaría sin alimentación a todo el sistema de corriente continua.
• Barra de TDCA única para cargas esenciales y no esenciales: No existe una segregación de cargas, lo que significa que una falla en una carga no esencial puede afectar el suministro a cargas críticas.
• Un solo rectificador: Una falla en el rectificador dejaría al sistema dependiente únicamente del banco de baterías, limitando su autonomía.
• Un solo banco de baterías: Si el banco de baterías falla o se agota su capacidad, el sistema de corriente continua quedaría completamente inoperativo.
• Barra de TDCC única para cargas esenciales y no esenciales: No existe una segregación de cargas, lo que significa que una falla en una carga no esencial puede afectar el suministro a cargas críticas.

2.4. Esquemas de sistemas de corriente continua de alta disponibilidad para la ES-SRO

2.4.1. Barraje de distribución seccionado con dos rectificadores

2.4.1.1. Descripción

El esquema de la Figura 13 utiliza dos rectificadores para alimentar una barra de distribución de corriente continua (CC) que está dividida en dos secciones. Cada sección de la barra alimenta un conjunto diferente de cargas de CC en la estación. Se propone alimentar las protecciones y accionamientos motorizados asociados a los niveles de tensión de 220kV y 66 kV en una sección de la barra y las protecciones y accionamientos motorizados asociados al nivel de tensión de 23kV en la otra sección.

Cada rectificador está alimentado por una fuente de corriente alterna (CA) independiente, alimentada por el único transformador 23 kV de SSAA debido a que la estación no cuenta con la posibilidad de instalar un segundo transformador que dependa de un segundo transformador de potencia de 220kV/23kV lo que proporcionaría redundancia al sistema. En caso de falla de un rectificador, el otro puede continuar alimentando las cargas conectadas a su sección de la barra. El rectificador nuevo deberá tener las mismas características técnicas del rectificador existente, el rectificador debe ser capaz de cargar la batería mientras atiende los consumos permanentes de las dos barras. Se utiliza el banco de baterías existente para los dos rectificadores, para proporcionar respaldo en caso de una falla total de la alimentación CA.

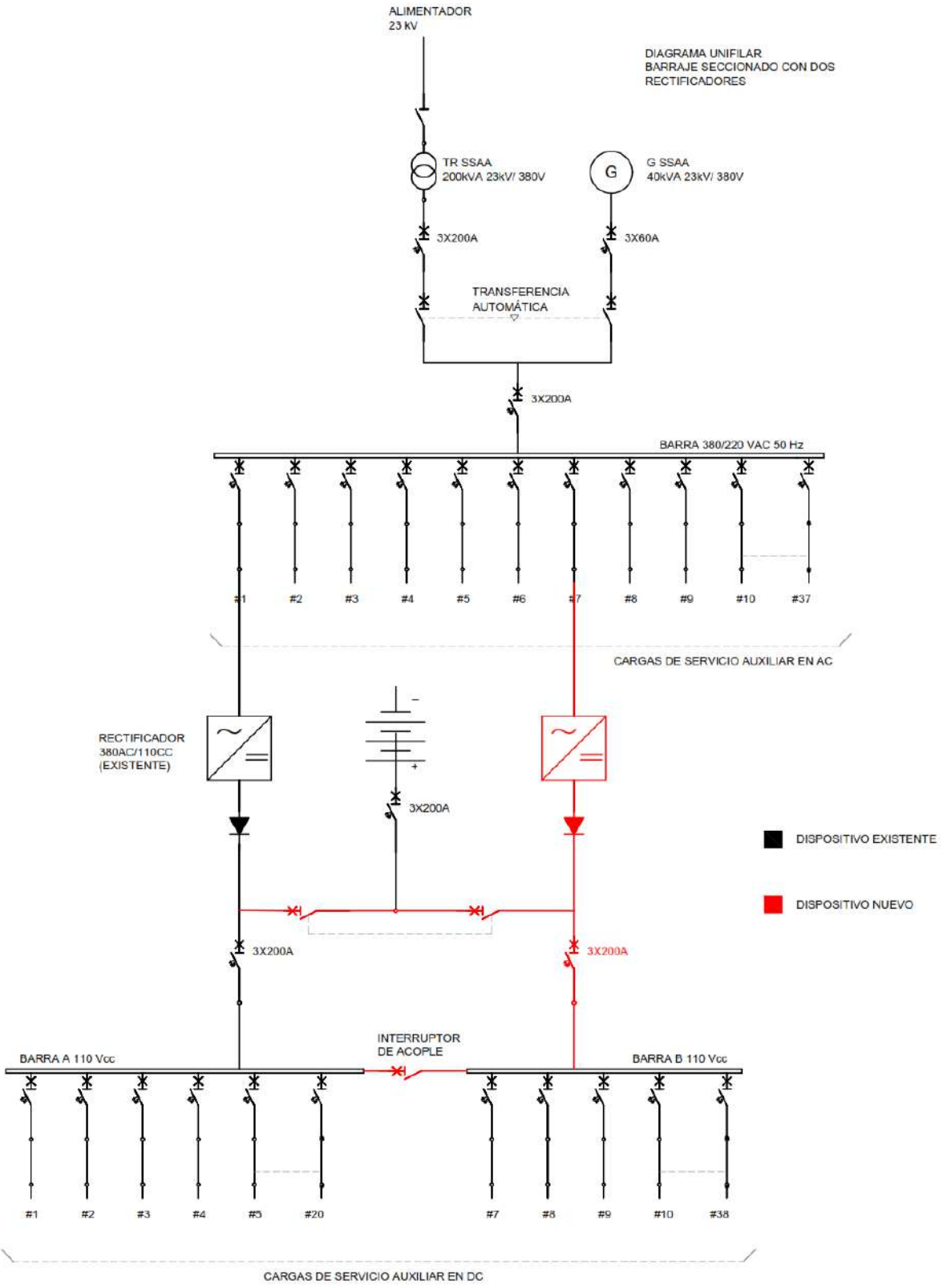


Figura 13. Esquema de barraje de distribución seccionado con dos rectificadores.

2.4.1.2. Ventajas

• **Mayor confiabilidad:** La redundancia proporcionada por los dos rectificadores y las dos secciones de la barra reduce el riesgo de una interrupción total del suministro de CC. Si un rectificador falla, la otra sección de la barra puede continuar alimentando sus cargas críticas.

• **Flexibilidad:** Permite la distribución de cargas en ambas secciones de la barra, buscando la duplicidad en la fuente. Se puede alimentar, por ejemplo, las protecciones y accionamiento asociados a un nivel de tensión en un tramo de la barra.

• **Mantenimiento:** Se puede realizar el mantenimiento de un rectificador sin afectar el suministro de CC a la otra sección de la barra.

2.4.1.3. Desventajas

• **Costo:** La inversión inicial es mayor en comparación con el esquema de un solo cargador y una sola barra.

• **Complejidad:** Requiere una planificación y un diseño más cuidadosos para garantizar la correcta coordinación entre los dos rectificadores y la protección del sistema.

• **Espacio:** Necesita más espacio físico para la instalación de los dos rectificadores.

Es importante destacar que, aunque este esquema ofrece una mayor confiabilidad que el esquema de un solo cargador, no es completamente redundante. Si falla la fuente de CA que alimenta a ambos rectificadores, todo el sistema de CC se verá afectado.

2.4.2. Dos rectificadores en paralelo y dos bancos de baterías

2.4.2.1. Descripción

En el esquema presentado en la Figura 14, dos rectificadores se conectan en paralelo para alimentar una barra de distribución de corriente continua (CC). Cada rectificador tiene su propio banco de baterías asociado, que proporciona respaldo en caso de falla del rectificador o de la alimentación de corriente alterna (CA). Este esquema ofrece un alto nivel de redundancia y confiabilidad, ya que la falla de un rectificador o banco de baterías no afecta el funcionamiento del otro.

Tanto el nuevo rectificador como el banco de baterías deben tener las mismas características técnicas que los equipos existentes.

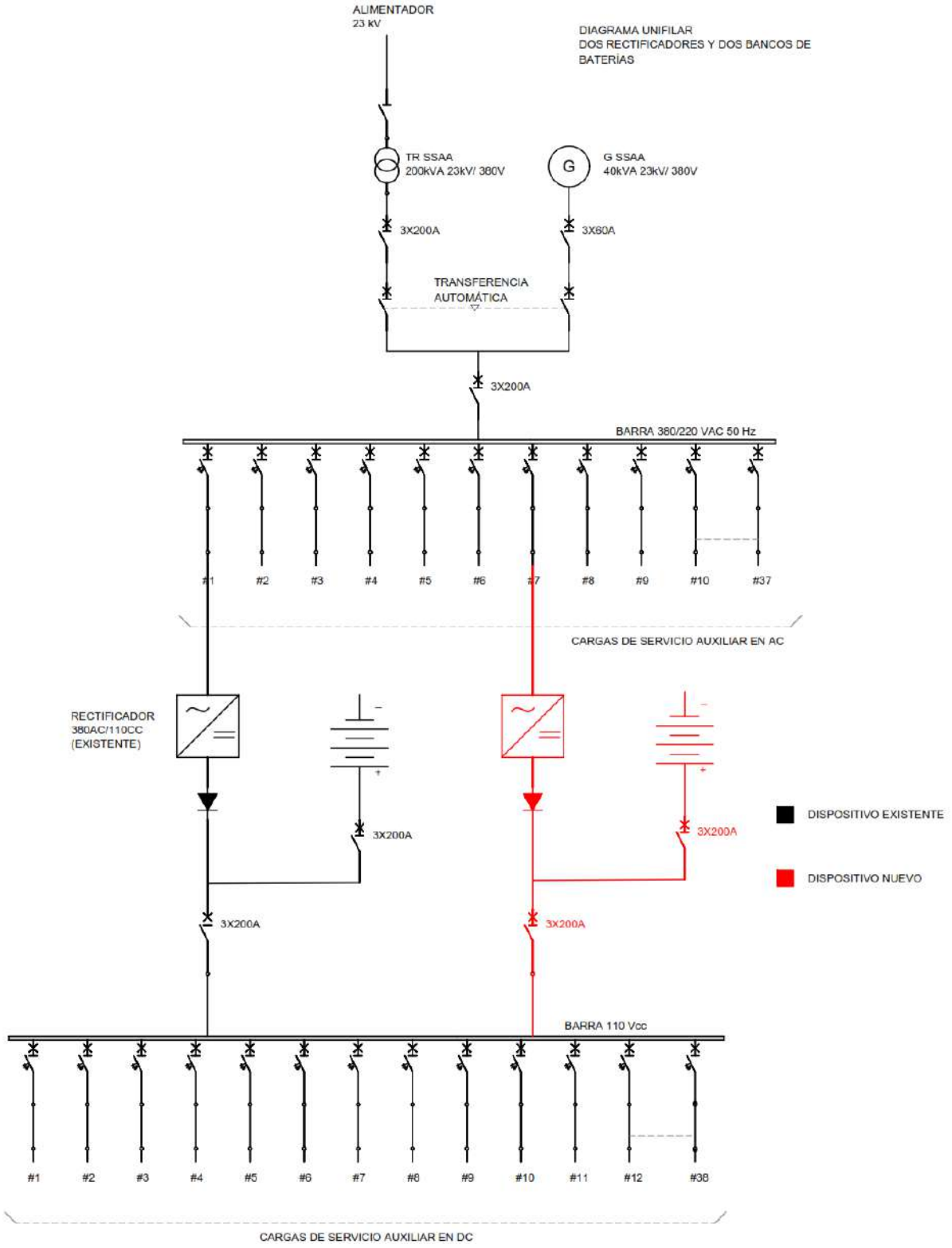


Figura 14. Esquema con dos rectificadores en paralelo y dos bancos de baterías.

2.4.2.2. Ventajas

• **Alta confiabilidad:** La redundancia proporcionada por los dos rectificadores y los dos bancos de baterías garantiza un suministro de CC altamente confiable, minimizando el riesgo de interrupciones.

• **Mayor capacidad de carga:** Permite manejar una mayor demanda de corriente CC en comparación con los esquemas más simples.

• **Flexibilidad en el mantenimiento:** Se puede realizar el mantenimiento de un rectificador o banco de baterías sin afectar el funcionamiento del otro.

• **Protección contra fallas:** La conexión en paralelo de los rectificadores y el uso de diodos de bloqueo y contraceldas ayudan a limitar la propagación de fallas, mejorando la estabilidad del sistema.

2.4.3.3. Desventajas

• **Costo:** Es el esquema más costoso de implementar, ya que requiere la duplicación de los rectificadores, bancos de baterías y equipos de protección.

• **Complejidad:** Requiere un diseño y una coordinación de protecciones más complejos para asegurar un funcionamiento correcto y una respuesta adecuada ante fallas.

• **Mayor espacio físico:** La instalación de dos rectificadores y dos bancos de baterías requiere un mayor espacio físico en la estación.

• **Posible arrastre de fallas:** Si no se implementan adecuadamente las contraceldas y los bloqueos electrónicos, un banco de baterías en mal estado podría afectar al otro banco.

• **Sobredimensionamiento de baterías:** Para garantizar una redundancia completa, cada banco de baterías debe tener la capacidad de suplir la demanda de toda la estación, lo que puede resultar en un sobredimensionamiento.

El esquema de "Dos rectificadores en paralelo y dos bancos de baterías" ofrece la mayor confiabilidad y capacidad de carga, pero a un costo más elevado y con una mayor complejidad de diseño e instalación.

2.4.3. Señalización de fallas en sistema de corriente continua

2.4.3.1. Descripción

La señalización de fallas en un sistema de corriente continua (CC) es un elemento fundamental para la detección temprana de problemas y la rápida actuación para evitar daños mayores. Se trata de un sistema que monitoriza constantemente el estado de los componentes del sistema de CC, como rectificadores, bancos de baterías, interruptores y la propia barra de distribución.

En caso de detectar una anomalía, como una sobrecarga, un cortocircuito o un fallo en un componente, el sistema de señalización emite una alarma que alerta a los operadores de la estación. Esta alarma puede ser visual, sonora o ambas, y puede estar ubicada en el propio tablero de CC o en un panel de control centralizado, en el ANEXO 4 se describe las características del cuadro de alarmas.

La señalización de fallas se puede implementar en cualquiera de los esquemas de CC mencionados anteriormente (un solo cargador, barraje seccionado, dos rectificadores en paralelo), añadiendo un nivel de seguridad adicional.

En la Figura 15 se presenta un unifilar del esquema propuesto.

2.4.3.2. Ventajas

• **Detección temprana de fallas:** Permite identificar problemas en el sistema de CC antes de que se conviertan en fallas mayores, evitando daños a los equipos y posibles interrupciones del servicio.

• **Reducción del tiempo de respuesta:** La señalización inmediata de las fallas facilita la rápida actuación del personal de mantenimiento, minimizando el tiempo de inactividad del sistema.

• **Mayor seguridad:** Un sistema de señalización efectivo contribuye a la seguridad del personal al alertar sobre condiciones potencialmente peligrosas.

• **Mejoras en el mantenimiento:** La información proporcionada por el sistema de señalización ayuda a optimizar las tareas de mantenimiento, identificando los componentes que requieren atención.

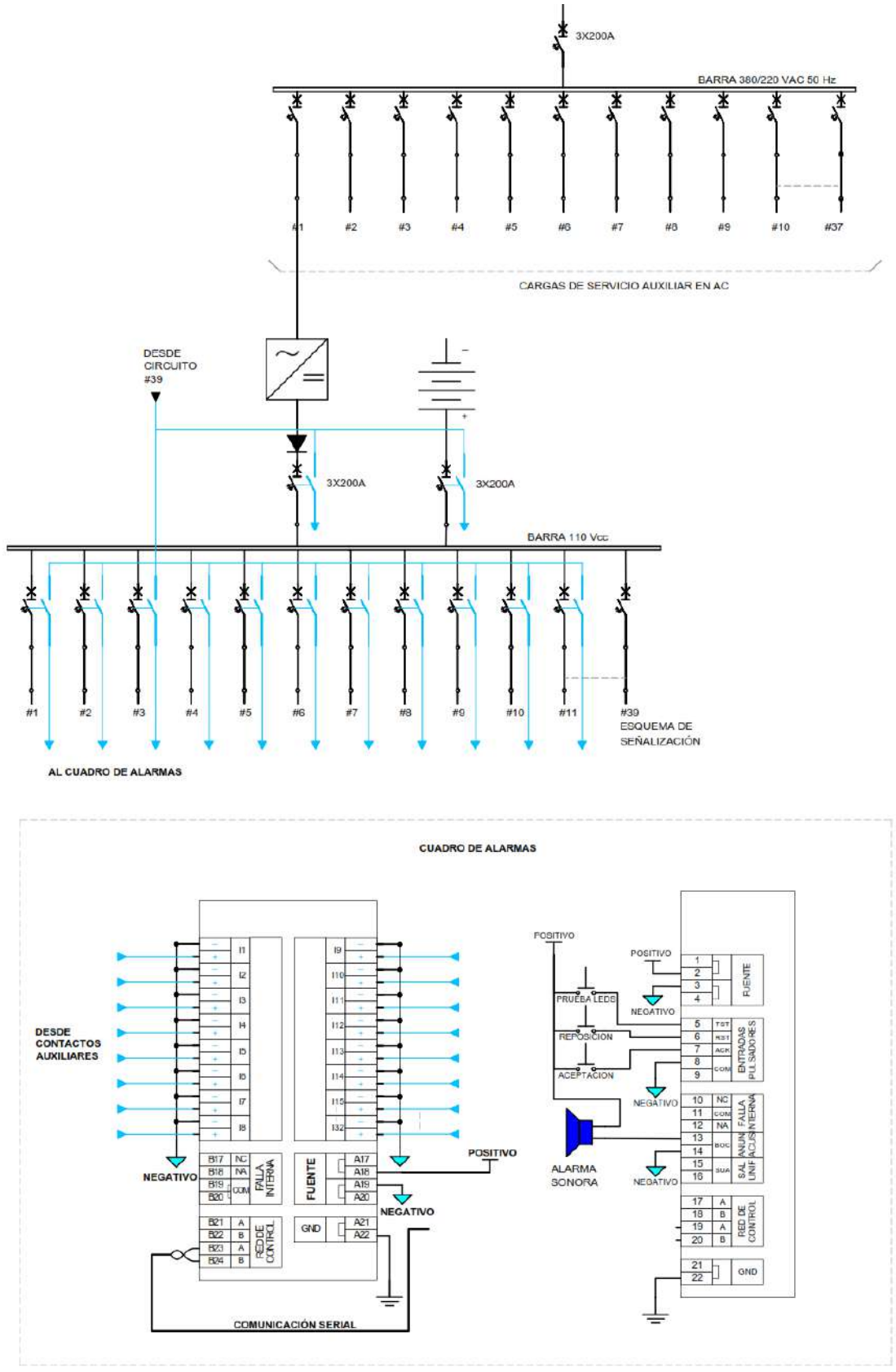


Figura 15. Esquema de señalización de fallas en sistema de corriente continua.

2.4.3.3. Desventajas

• **Costo:** La implementación de un sistema de señalización de fallas implica un costo adicional, que puede ser mayor en función de la complejidad del sistema y del nivel de detalle de la información que se desea obtener.
• **Complejidad:** Requiere un diseño e instalación cuidadosos para garantizar que el sistema de señalización funcione correctamente y proporcione información precisa.

2.4.3.4. Relación con las alternativas anteriores:

Independientemente del esquema de CC elegido, la incorporación de un sistema de señalización de fallas mejora la confiabilidad y seguridad del sistema, permitiendo una detección temprana de problemas y una respuesta más rápida ante eventuales fallas.
Consideraciones adicionales:
• Se recomienda utilizar interruptores automáticos con contactos auxiliares (NA/NC) para señalizar la actuación de las protecciones en el tablero de CC.
• El sistema de señalización debe estar integrado con el sistema de control de la estación para una gestión centralizada de la información.
• Es importante realizar un mantenimiento periódico del sistema de señalización para asegurar su correcto funcionamiento.

2.4.4. Rectificador con banco de baterías y sistema fotovoltaico con almacenamiento.

2.4.4.1. Descripción

La alternativa que se muestra en la Figura 16 combina un sistema tradicional de corriente continua (CC) con un sistema de energía solar fotovoltaica. Consiste en un rectificador que alimenta un banco de baterías Ni-Cd y la barra de CC. Adicionalmente, se incorpora un cargador MPPT conectado a un sistema fotovoltaico con una capacidad de 20.80 kWp, que también alimenta la barra de CC con su respectivo almacenamiento.

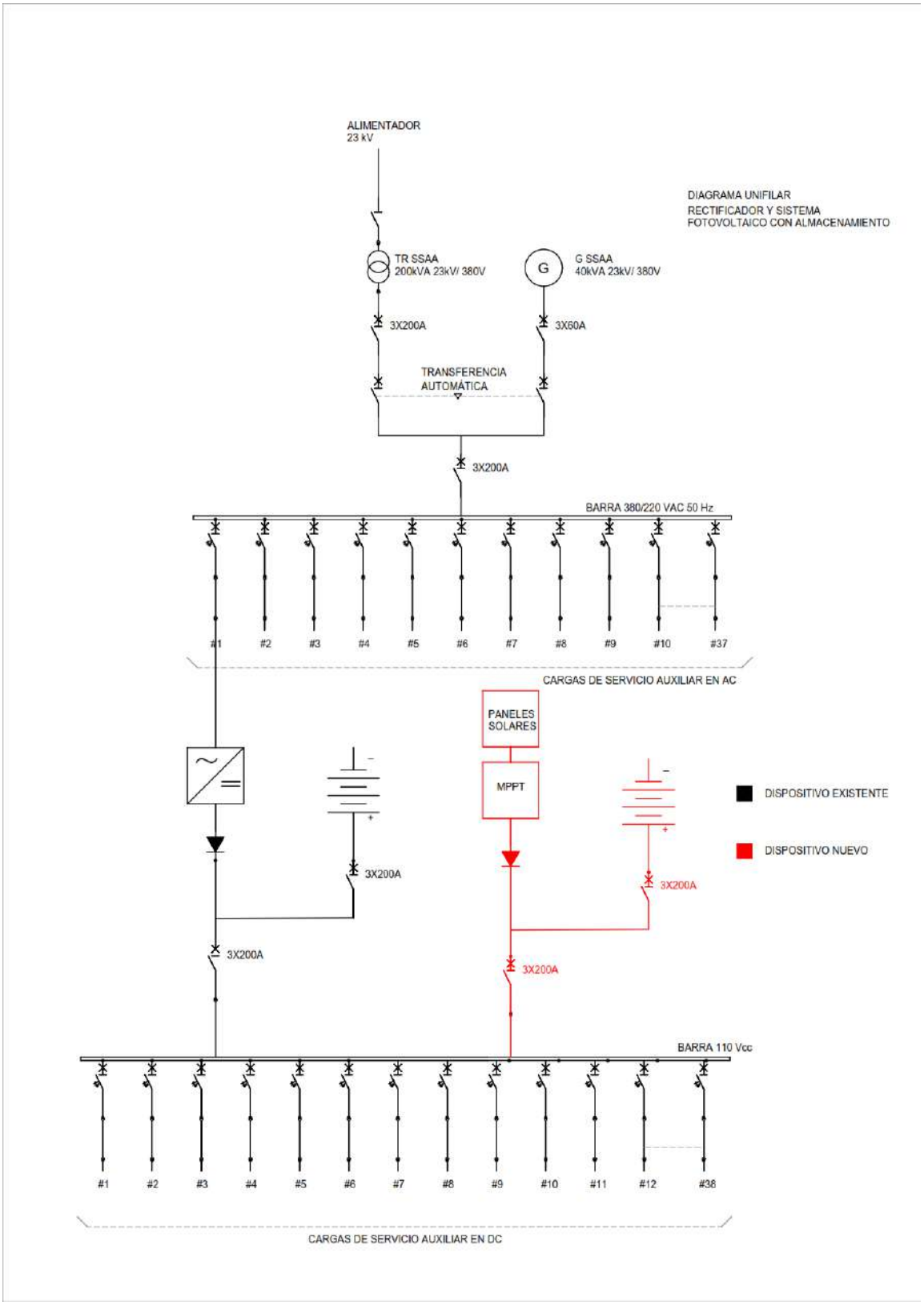


Figura 16. Esquema con rectificador con banco de baterías y sistema fotovoltaico con almacenamiento.

2.4.4.2. Ventajas

• **Energía renovable:** El sistema fotovoltaico aprovecha la energía solar, una fuente de energía renovable, reduciendo la dependencia de la red eléctrica y las emisiones de gases de efecto invernadero.

• **Ahorro de energía:** La energía solar generada por el sistema fotovoltaico puede reducir el consumo de energía de la red eléctrica, disminuyendo los costos operativos.

• **Redundancia:** La combinación de un rectificador y un sistema fotovoltaico proporciona redundancia en el suministro de energía a la barra de CC, aumentando la confiabilidad del sistema.

2.4.4.3. Desventajas

• **Incompatibilidad de las baterías Ni-Cd:** Las baterías de níquel-cadmio (Ni-Cd) no son comunes en sistemas solares. Existen alternativas más eficientes y sostenibles como las baterías de iones de litio o Ni-MH (Níquel-Hidruro Metálico) [13].

• **Tensión del sistema:** Las tensiones normalizadas de los sistemas solares generalmente no son de 110V (Tensión estándar utilizadas en estaciones de la ANDE para sistemas auxiliares en CC). Se requiere una investigación adicional para verificar la compatibilidad de las tensiones entre el sistema fotovoltaico y la barra de CC.

• **Mezcla de tecnologías de baterías:** No se recomienda mezclar baterías Ni-Cd y plomo-ácido en un mismo sistema debido a las diferencias en sus características químicas, voltajes nominales, ciclos de carga y descarga, entre otros factores. Esta mezcla puede causar desbalances en el sistema, afectar el rendimiento general y la vida útil de las baterías.

2.5. Presupuesto de las alternativas

En esta sección, se presenta un análisis detallado del costo asociado a cada una de las alternativas propuestas para la mejora del sistema de corriente continua en la ES-SRO. Se busca determinar la inversión inicial como los costos de los componentes principales y mano de obra. Los presupuestos se detallan mediante tablas para cada alternativa. Para los precios fueron consultados licitaciones públicas hechas por la ANDE y proveedores nacionales.

2.5.1. Presupuesto de barraje de distribución seccionado con dos rectificadores

A continuación, se detalla el presupuesto para la implementación del esquema "Barraje de distribución seccionado con dos rectificadores" en la ES-SRO.

La Tabla 1 presenta un desglose de los componentes necesarios, el costo de mano de obra, la cantidad requerida, el precio unitario en guaraníes (Gs.) y el subtotal para cada ítem.

Tabla 1. Presupuesto del esquema de barraje de distribución seccionado con dos rectificadores.

Ítem Nº	**Descripción**	**Unid.**	**Precio unitario [Gs.]**	**Subtotal**
1	Rectificador de 110 Vcc 50A	1	39.384.800	39.384.800
2	Diodo 200A	1	300.000	300.000
3	Interruptor de interenclavamiento	1	3.966.999	3.966.999
4	Interruptor termomagnético para CC	38	262.500	9.975.000
5	Interruptor de acoplamiento	1	1.983.500	1.983.500
6	Conductor de cobre para CC	Global	7.205.510	7.205.510
7	Barra de Cobre	Global	417.000	417.000
8	Interruptor Caja moldeada para CC	1	2.578.550	2.578.550
9	Tablero	1	2.000.000	2.000.000
10	Riel DIN	4	12.000	48.000
11	Terminales	Global	320.000	320.000
12	Mano de obra	Global	32.000.000	32.000.000
Total [Gs.]				**100.179.359**

2.5.2. Presupuesto de dos rectificadores en paralelo y dos bancos de baterías

A continuación, se detalla el presupuesto para la implementación del esquema "Dos rectificadores en paralelo y dos bancos de baterías" en la ES-SRO.

La Tabla 2 presenta un desglose de los componentes necesarios, el costo de mano de obra, la cantidad requerida, el precio unitario en guaraníes (Gs.) y el subtotal para cada ítem.

Tabla 2. Presupuesto del esquema dos rectificadores en paralelo y dos bancos de baterías.

Ítem Nº	**Descripción**	**Unid.**	**Precio unitario [Gs.]**	**Subtotal**
1	Rectificador de 110 Vcc 50A	1	39.384.800	39.384.800
2	Diodo 200A	1	300.000	300.000
3	Banco de Baterías de Ni-Cd 305Ah	1	197.000.000	197.000.000
4	Conductor de cobre para CC	Global	10.720.550	10.720.550
5	Barra de Cobre	Global	417.000	417.000
6	Interruptor Caja moldeada para CC	2	2.578.550	5.157.100
7	Interruptor termomagnético para CC	38	262.500	9.975.000
9	Tablero eléctrico metálico	1	2.000.000	2.000.000
10	Riel DIN	4	12.000	48.000
11	Terminales	Global	360.000	360.000
12	Mano de obra	Global	140.463.098	140.463.098
Total [Gs.]				**405.825.548**

2.5.3. Presupuesto de rectificador con banco de baterías y sistema fotovoltaico con almacenamiento

A continuación, se detalla el presupuesto para la implementación del esquema "Rectificador con banco de baterías y sistema fotovoltaico con almacenamiento" en la ES-SRO.

La Tabla 3 presenta un desglose de los componentes necesarios, el costo de mano de obra, la cantidad requerida, el precio unitario en guaraníes (Gs.) y el subtotal para cada ítem.

Tabla 3. Presupuesto del esquema de rectificador con banco de baterías y sistema fotovoltaico con almacenamiento

Ítem Nº	Descripción	Unid.	Precio unitario [Gs.]	Subtotal
1	Paneles LG 260 S1C-B3	80	3.040.000	243.200.000
2	Cargador MPPT 8kW	2	15.716.448	31.432.896
3	Soporte de aluminio	5	4.000.000	20.000.000
4	Conectores MC4	14	100.000	1.400.000
5	Cable Cu para CC	Global	300.000	300.000
6	Protección DC	1	550.000	550.000
7	Protección AC	1	565.000	565.000
8	Tablero de combinación	1	600.000	600.000
9	Banco de baterías Pb-Ac 305 Ah	1	64.000.000	64.000.000
10	Interruptor Caja moldeada para CC	2	2.578.550	5.157.100
11	Interruptor termomagnético para CC	38	262.500	9.975.000
12	Tablero eléctrico metálico	1	2.000.000	2.000.000
13	Riel DIN	4	12.000	48.000
4	Terminales	Global	440.000	440.000
15	Mano de obra	Global	221.815.000	221.815.000
Total [Gs.]				**601.482.996**

2.5.4. Presupuesto de señalización de fallas en sistema de corriente continua

A continuación, se detalla el presupuesto para la implementación del esquema "Señalización de fallas en sistema de corriente continua" en la ES-SRO.

La Tabla 4 presenta un desglose de los componentes necesarios, el costo de mano de obra, la cantidad requerida, el precio unitario en guaraníes (Gs.) y el subtotal para cada ítem.

Tabla 4. Presupuesto del esquema señalización de fallas en sistema de corriente continua.

Ítem Nº	**Descripción**	**Unid.**	**Precio unitario [Gs.]**	**Subtotal**
1	Cuadro de alarmas para sistema de señalización	1	37.311.840	37.311.840
2	Conductores Cu 2,5 mm2	Global	8.880.304	8.880.304
3	Contactos auxiliares	Global	7.089.680	7.089.680
4	Terminales	Global	360.000	360.000
5	Alarma sonora	1	140.000	140.000
6	Mano de obra	Global	37.549.000	37.549.000
7	Interruptor termomagnético para CC	1	262.500	262.500
Total [Gs.]				**91.593.324**

2.6. Comparación entre el esquema actual y los propuestos

A continuación, se presenta en la Tabla 5 una comparativa que detalla distintos esquemas de distribución de corriente continua, describiendo sus ventajas y desventajas, para facilitar la selección del sistema más adecuado según los requerimientos técnicos y operativos.

Tabla 5. Comparativa del esquema actual y los esquemas propuestos.

Esquema	**Ventajas**	**Desventajas**
Un solo cargador y banco de baterías con una barra de distribución	* Simplicidad * Bajo costo * Adecuado para estaciones de menor importancia	* Baja confiabilidad * Sin redundancia * Limitada capacidad de expansión
Barraje de distribución seccionado con dos rectificadores	* Mayor confiabilidad * Flexibilidad * Facilita el mantenimiento	* Mayor costo inicial * Mayor complejidad * Mayor espacio físico requerido
Dos rectificadores en paralelo y dos bancos de baterías	* Alta confiabilidad * Mayor capacidad de carga * Flexibilidad en el mantenimiento * Protección contra la propagación de fallas	* Costo elevado * Complejidad en el diseño y la coordinación de protecciones * Requiere mayor espacio físico * Posible arrastre de fallas entre bancos de baterías * Sobredimensionamiento de baterías
Señalización de fallas en sistema de corriente continua	* Detección temprana de fallas * Reducción del tiempo de respuesta * Mayor seguridad * Mejoras en el mantenimiento	* Costo adicional * Complejidad en el diseño e instalación
Rectificador con Banco de baterías y sistema fotovoltaico con almacenamiento.	* Energía renovable * Ahorro de energía * Redundancia	* Incompatibilidad de las baterías Ni-Cd: No son comunes en sistemas solares, existen alternativas más eficientes. * Tensión del sistema: Posible incompatibilidad entre las tensiones del sistema fotovoltaico y la barra de CC. * Mezcla de tecnologías de baterías: No se recomienda mezclar baterías Ni-Cd y plomo-ácido.

2.7. Criterios para la selección de alternativa

Para la selección de la alternativa más adecuada para el esquema de corriente continua de la ES-SRO, se deben considerar diversos criterios que permitan evaluar el impacto de cada opción en la operación de la estación. Los cuales son:

2.7.1. Confiabilidad

• **Definición:** Capacidad del sistema para operar de forma continua y sin interrupciones, incluso en presencia de fallas en sus componentes.

Un esquema de CC altamente confiable debe contar con redundancia en sus componentes clave (transformadores, rectificadores, baterías) y un sistema de protecciones robusto y selectivo que permita aislar las fallas sin afectar la operación del resto del sistema.

2.7.2. Flexibilidad

• **Definición:** Capacidad del sistema para adaptarse a cambios en las condiciones de operación, como la adición de nuevas cargas o la modificación de los requerimientos de energía.

Un esquema de CC flexible debe permitir la conexión y desconexión de cargas sin interrupciones del servicio, así como la expansión del sistema para adaptarse a futuras necesidades de la estación.

2.7.3. Costo

• **Definición:** Inversión inicial necesaria para la implementación del esquema de CC, incluyendo la adquisición de equipos, materiales e instalación.

Se busca un equilibrio entre la confiabilidad y la flexibilidad del sistema con un costo razonable y acorde al presupuesto disponible. Es importante considerar no solo el costo inicial, sino también los costos a largo plazo asociados al mantenimiento y la operación del sistema.

2.7.4. Complejidad

• **Definición:** Grado de dificultad en la instalación, operación y mantenimiento del esquema de CC, considerando la cantidad de componentes, la interconexión entre los mismos y la sofisticación de las tecnologías empleadas.

Mientras más complejo sea el sistema, mayor será la probabilidad de fallas y la dificultad para su diagnóstico y reparación. Se debe buscar un esquema que ofrezca la confiabilidad y flexibilidad requerida con el menor grado de complejidad posible.

2.7.5. Mantenimiento

• **Definición:** Actividades necesarias para asegurar el correcto funcionamiento del esquema de CC a lo largo de su ciclo de vida, incluyendo inspecciones periódicas, limpieza, reemplazo de componentes, pruebas y calibración.

Se debe considerar la facilidad de acceso a los componentes para el mantenimiento, la disponibilidad de repuestos, la necesidad de personal especializado y la frecuencia de las actividades de mantenimiento. Un esquema que requiera un mantenimiento complejo y costoso puede afectar la disponibilidad del sistema y aumentar los costos operativos.

2.7.6. Espacio físico

• **Definición:** Superficie necesaria para la instalación del esquema de CC, incluyendo los equipos principales (rectificadores, baterías), el tablero de distribución, el cableado y los elementos de seguridad.

Se considera la disponibilidad de espacio físico en la estación para la instalación del esquema de CC. Un esquema que requiera un espacio considerable puede limitar las opciones de diseño y aumentar los costos de construcción.

La selección de la alternativa de esquema de corriente continua para la ES-SRO se basa en un análisis de estos criterios, ponderando su importancia de acuerdo a las necesidades específicas de la estación. El objetivo es encontrar un esquema que ofrezca un equilibrio óptimo entre confiabilidad, flexibilidad, costo, complejidad, mantenimiento y espacio físico.

En base a la experiencia del incendio, se puede inferir que la confiabilidad y la redundancia son factores cruciales en la selección del nuevo esquema de CC. Se busca

una solución que garantice la continuidad del servicio, incluso ante eventos imprevistos como la falla simultánea de varios componentes.

2.8. Selección de alternativas

2.8.1. Escala numérica

Para la selección del esquema de sistema de corriente continua más adecuado para la ES-SRO, se propone un criterio que utiliza una escala numérica (de 1 al 5).

A continuación, se presenta en la Tabla 6 un resumen de los criterios a tener en cuenta para la selección del esquema de corriente continua, junto con una escala de valoración para cada criterio:

Tabla 6. Escala numérica de cada criterio para la selección de las alternativas.

Criterio	**Descripción**	**Valoración**
Confiabilidad	Capacidad del sistema para operar de manera continua y sin interrupciones.	5: Excelente 4: Muy bueno 3: Bueno 2: Regular 1: Malo
Flexibilidad	Capacidad del sistema para adaptarse a cambios en las cargas o requerimientos operativos.	5: Excelente 4: Muy bueno 3: Bueno 2: Regular 1: Malo
Costo	Inversión inicial y costos de operación y mantenimiento.	1: Muy alto 2: Alto 3: Moderado 4: Bajo 5: Muy bajo
Complejidad	Dificultad de diseño, instalación y operación del sistema.	1: Muy complejo 2: Complejo 3: Moderado

		4: Simple 5: Muy simple
Mantenimiento	Facilidad de realizar tareas de mantenimiento preventivo y correctivo.	5: Muy fácil 4: Fácil 3: Moderado 2: Difícil 1: Muy difícil
Espacio físico	Necesidad de modificar la estructura civil para la instalación del sistema.	5: Sin modificaciones. 4: Algunas modificaciones menores. 3: Modificaciones moderadas. 2: Espacio limitado, con restricciones significativas. 1: Espacio muy limitado, inviable sin modificaciones estructurales.

En la Tabla 7 se presenta los resultados de la escala numérica presentada resultando como la alternativa con mayor puntaje el esquema “Dos rectificadores en paralelo y dos bancos de baterías”.

Tabla 7. Comparativa de alternativas utilizando los criterios seleccionados.

Esquema	Confiabilidad	Flexibilidad	Costo	Complejidad	Mantenimiento	Espacio físico	**Total**
Un solo cargador y banco de baterías con una barra de distribución	1	1	4	4	4	5	19
Barraje de distribución seccionado con dos rectificadores	3	3	3	3	4	4	20
Dos rectificadores en paralelo y dos bancos de baterías	5	4	2	2	3	3	19
Rectificador con banco de baterías y sistema fotovoltaico con almacenamiento.	5	4	2	1	3	3	18

2.8.2. Selección de alternativa

En base a la información proporcionada en la Tabla 5 y Tabla 7 y considerando los inconvenientes del sistema actual de la ES-SRO, la mejor alternativa para mejorar la confiabilidad del sistema de corriente continua en la Estación Santa Rosa sería la implementación del esquema "Barraje de distribución seccionado con dos rectificadores" complementándose con la "Señalización de fallas en sistema de corriente continua".

A continuación, se explican las razones de esta elección:

• **Mayor confiabilidad:** Este esquema proporciona un nivel de redundancia superior al esquema actual de la ES-SRO, que cuenta con un solo rectificador y un solo banco de baterías. La división de la barra de distribución en dos secciones y la utilización de dos rectificadores con fuentes de alimentación independientes minimizan el riesgo de una interrupción total del suministro de CC. En caso de falla de un rectificador, la otra sección de la barra puede continuar alimentando las cargas críticas.

• **Flexibilidad:** El esquema de barraje seccionado permite distribuir las cargas de CC de manera estratégica, buscando la duplicidad en la fuente. Se propone alimentar las protecciones y accionamientos motorizados asociados a los niveles de tensión de 220kV y 66 kV en una sección de la barra y las protecciones y accionamientos motorizados asociados a los niveles de tensión de 23kV en la otra sección, lo que aumentara la resiliencia del sistema ante fallas.

• **Mantenimiento:** La utilización de dos rectificadores y una barra seccionada facilita las tareas de mantenimiento, ya que se puede desconectar un rectificador para su revisión o reparación sin afectar el suministro de CC a la otra sección de la barra.

• **Costo y complejidad:** Si bien este esquema es más costoso que el esquema actual de la ES-SRO, su costo es inferior al del esquema de "Dos rectificadores en paralelo y dos bancos de baterías". Además, su complejidad de diseño e implementación es menor, lo que facilita su adopción en la ES-SRO.

El esquema de "Barraje de distribución seccionado con dos rectificadores" ofrece un equilibrio óptimo entre confiabilidad, flexibilidad, costo y complejidad, lo que lo convierte en la mejor alternativa para la ES-SRO, considerando las deficiencias del sistema actual y la necesidad de mejorar la disponibilidad del suministro de CC.

Adicionalmente, se propone la implementación de un sistema de "Señalización de fallas en sistema de corriente continua" en la ES-SRO es fundamental para fortalecer la seguridad y confiabilidad del sistema de CC. Su capacidad de detección temprana, alerta inmediata y compatibilidad con otros esquemas la convierten en una inversión estratégica para prevenir futuros incidentes y garantizar la continuidad del servicio eléctrico.

Es importante destacar que la "Señalización de fallas en sistema de corriente continua" no es una alternativa excluyente, sino que complementa y mejora la seguridad de cualquier otro esquema de CC que se implemente en la ES-SRO.

En la Figura 18 se representa en un unifilar ambas alternativas seleccionadas y en la Figura 19 una vista 2D del Tablero de distribución de Corriente Continua (TDCC).

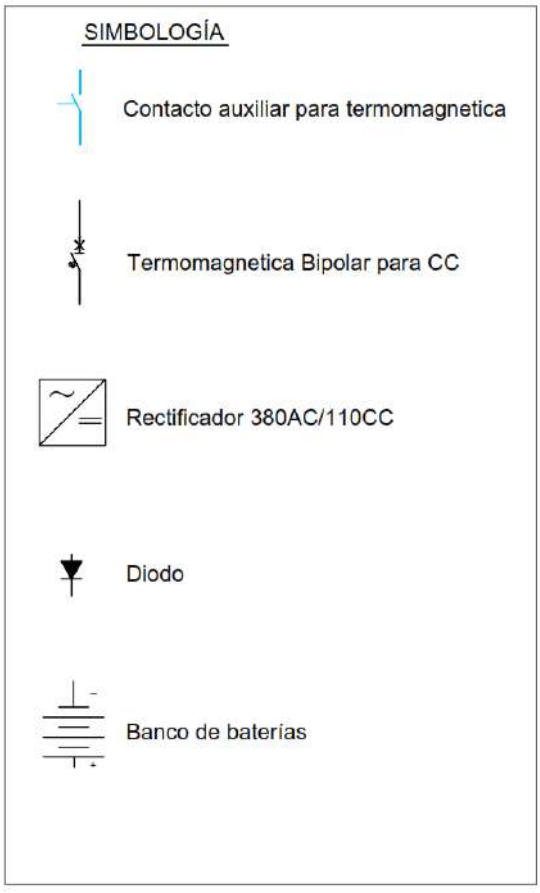


Figura 17.Simbología utilizada en esquemas unifilares.

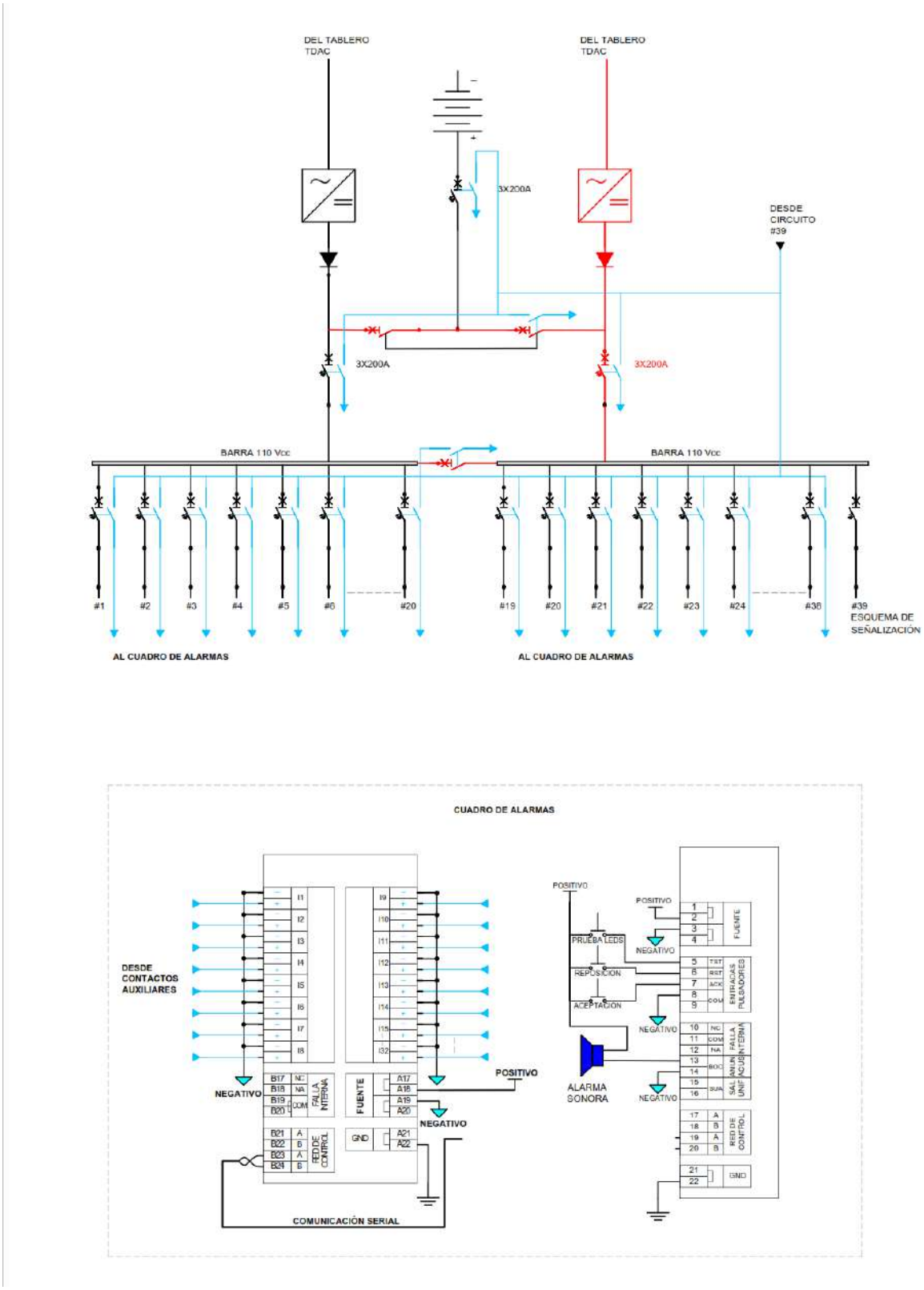


Figura 18. Unifilar de alternativas seleccionadas.

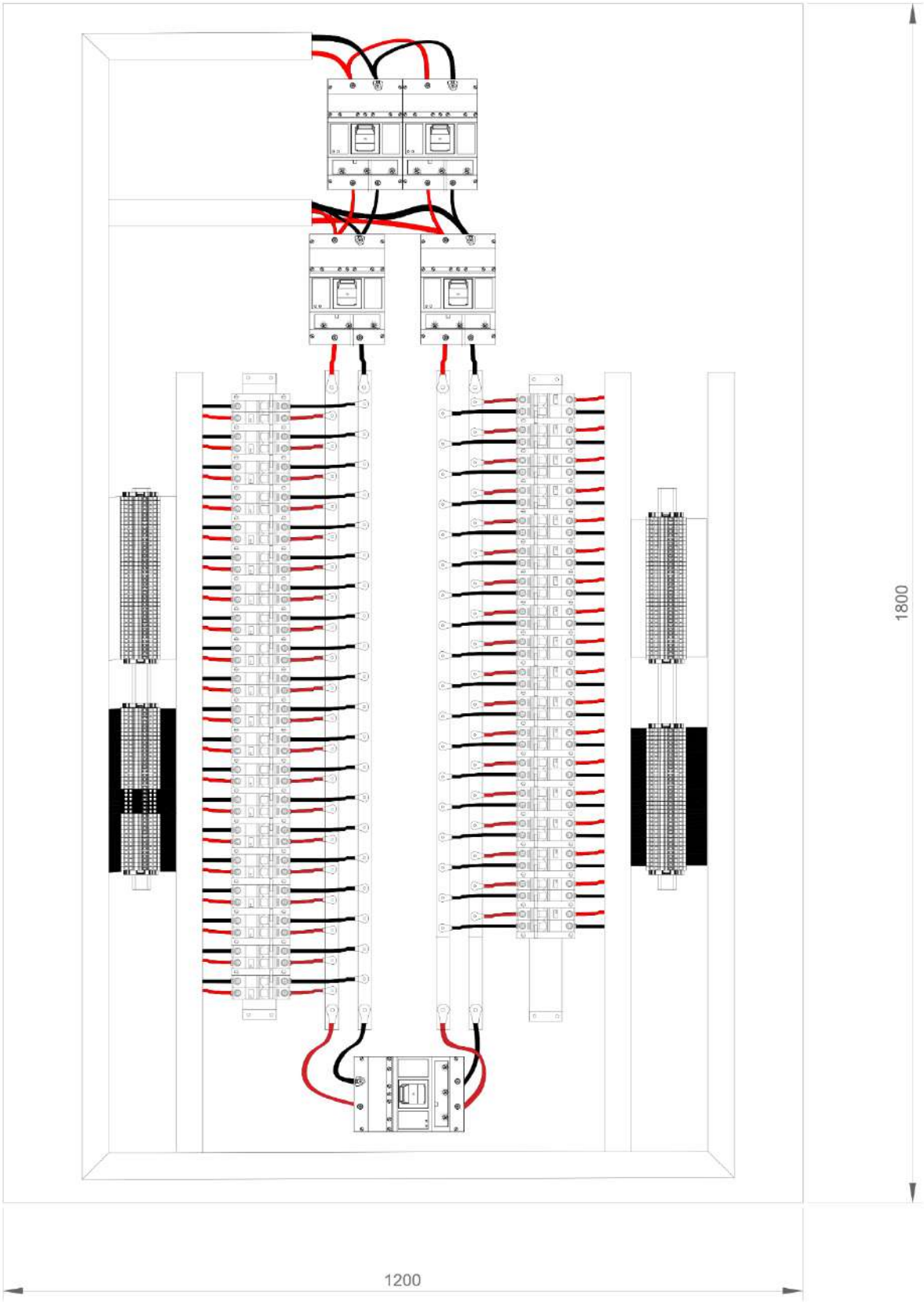


Figura 19. Modelo 2D del TDCC propuesto.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación, se resumen los principales resultados:

• **Análisis del Incendio**: Se determina que el incendio en la ES-SRO fue producto de una cadena de fallas que iniciaron con un problema en un alimentador de 23 kV. La falta de redundancia en el sistema de CC y la falla en la protección de respaldo impidieron la correcta operación del sistema, llevando a la pérdida de control y al incendio.

• **Esquema Actual Deficiente:** Se identifica las deficiencias del esquema actual de CC en la ES-SRO:

- Un único transformador de SSAA, lo que crea un punto único de falla.
- Falta de segregación de cargas en la barra del TDCC.
- Un solo rectificador y un único banco de baterías, limitando la redundancia y la autonomía del sistema.

• **Esquemas propuestos:** Se analizan cuatro esquemas para mejorar la confiabilidad del sistema de CC:

- **Barraje de distribución seccionado con dos rectificadores:** Este esquema ofrece redundancia en los rectificadores y la barra de distribución, aumentando la confiabilidad y la flexibilidad del sistema.
- **Dos rectificadores en paralelo y dos bancos de baterías:** Este esquema proporciona redundancia total, pero su alto costo y complejidad lo hacen menos viable para la ES-SRO.
- **Rectificador con banco de baterías y sistema fotovoltaico con almacenamiento:** Esta opción se descarta debido a la incompatibilidad de las baterías Ni-Cd existentes en la ES-SRO con los sistemas fotovoltaicos y la posible incompatibilidad de tensiones.
- **Señalización de fallas en sistema de corriente continua:** Se recomienda la implementación de un sistema de señalización de fallas, independientemente del esquema de CC elegido. Este sistema permite detectar problemas a tiempo y agilizar la respuesta ante fallas, mejorando la seguridad del sistema.

• **Criterios de Selección:** Se establecen criterios para seleccionar el esquema más adecuado, considerando la confiabilidad, flexibilidad, costo, complejidad, mantenimiento y espacio físico.

• **Análisis de Costos:** Se presenta un resumen del presupuesto para cada alternativa en la Tabla 8, facilitando la comparación económica.

Tabla 8. Presupuesto para cada alternativa.

Alternativa	**Costo [Gs.]**
Barraje de distribución seccionado con dos rectificadores	100.179.359
Dos rectificadores en paralelo y dos bancos de baterías	405.825.548
Rectificador con banco de baterías y sistema fotovoltaico con almacenamiento	601.482.996
Señalización de fallas en sistema de corriente continua	91.593.324

CONCLUSIONES

Se analizó la causa del incendio en la Estación Santa Rosa (ES-SRO), identificándose como una concatenación de fallas, iniciada por un evento en un alimentador de 23 kV que llevó a una falla en el Tablero de Corriente Continua (TDCC) durante el recierre.

Este análisis reveló la vulnerabilidad del esquema actual de corriente continua (CC), caracterizado por un único rectificador y un solo banco de baterías, lo que lo hace susceptible a fallas que pueden comprometer la operación de la estación.

Se determinó la necesidad de esquemas de protección y alimentación más robustos para mejorar la confiabilidad y seguridad del sistema de CC. Se exploraron diversas alternativas, incluyendo:

- Barraje de distribución seccionado con dos rectificadores.
- Dos rectificadores en paralelo y dos bancos de baterías.
- Señalización de fallas en el sistema de corriente continua.
- Rectificador con banco de baterías y sistema fotovoltaico con almacenamiento.

Se elaboraron esquemas de sistemas auxiliares de corriente continua con un enfoque en la redundancia y la protección. Se describieron las características, ventajas y desventajas de cada esquema propuesto.

Los esquemas de “Barraje seccionado con dos rectificadores” y "Señalización de fallas en sistema de corriente continua" se destacaron como las alternativas más viables por su equilibrio entre confiabilidad, flexibilidad y costo. En total se necesitan 191.772.683 Gs. para implementar ambos esquemas.

RECOMENDACIONES

- En base al análisis de los criterios de selección, los costos y las características del sistema actual, se recomienda la implementación del esquema "Barraje de distribución seccionado con dos rectificadores" en conjunto con un sistema de "Señalización de fallas en sistema de corriente continua". Esta combinación ofrece un equilibrio óptimo entre confiabilidad, flexibilidad y costo, solucionando las deficiencias del sistema actual y mejorando la disponibilidad del suministro de CC en la ES-SRO.
- Se requiere una investigación adicional para el diseño de un cargador MPPT para un sistema fotovoltaico con tensiones compatibles con la utilizada en la barra de CC (110 V) y que use como almacenamiento baterías Ni-Cd, esto con el fin de conseguir compatibilidad con la tecnología que utiliza la ANDE actualmente en las estaciones y subestaciones del SIN.

BIBLIOGRAFÍA

[1] J. E. C. Rodríguez, REQUERIMIENTOS DE SERVICIOS AUXILIARES DE UNA SUBESTACIÓN, Quito: ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL, 1978.

[2] R. Mercado Gimenez, DISEÑO DE UNA FUENTE DE ALIMENTACIÓN SEGURA Y EFICIENTE PARA LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN Y CONTROL DE LAS ESTACIONES Y SUBESTACIONES DEL SISTEMA CENTRO DE LA ANDE, Coronel Oviedo: FCyT, 2021.

[3] M. J. Thompson and D. Wilson, Auxiliary DC Control Power System Design for Substations, Georgia, 2007.

[4] J. R. Martín, Diseño de subestaciones eléctricas, UNAM, 1987.

[5] J. C. Escobar Romero, Diseño de subestaciones eléctricas, Escuela Colombiana de Ingeniería, 2014.

[6] MEJÍA VILLEGAS S.A., SUBESTACIONES DE ALTA Y EXTRAALTA TENSIÓN, Medellín, 1991.

[7] Hidrocantábrico Distribución Eléctrica, S.A.U., "Servicios Auxiliares de Subestaciones ET/4001," 2013.

[8] data power dear, MANUAL USE ID-2 SISTEMAS DE RESPALDO DE CORRIENTE CONTINURECTIFICADORES/CARGADORES DE BATERÍAS, 2005.

[9] I. T. o. I. Applications, New life for old thyristor power rectifiers using contemporary digital control, 2000.

[10] IEEE, IEEE Std. 946-2004, Recommended Practice for the Design of DC Auxiliary Power Systems for Generating Stations, 2005.

[11] C. D. Adorno Jacquet, PROPOSTA DE ESQUEMAS ESPECIAIS DE PROTEÇÃO PARA SISTEMAS DE 23 KV EM SUBESTAÇÕES, Itajubá , 2021.

[12] C. D. Adorno Jacquet, "Gerencia Técnica – Plan Operativo Anual 2021-2023," Encarnación, 2020.

[13] Team SB, "¿Se utilizan baterías de Ni-Cd en proyectos solares? [Pros y contras + alternativas]," 30 Marzo 2024. [Online]. Available: https://solarbuy.com/es/solar-101/are-ni-cd-batteries-used-in-solar-projects/. [Accessed 01 Enero 2025].

[14] ANDE, Especificación Técnica GT/DPM/003/2020, Asunción, 2020.

ANEXOS

ANEXO 1

A.1. Relevamiento de datos

A.1.1. Transformador de servicios auxiliares de la ES-SRO

Figura 20. Único transformador de 200 kVA de servicios auxiliares de la ES-SRO.

A.1.2. Diagrama del tablero de transferencia del generador

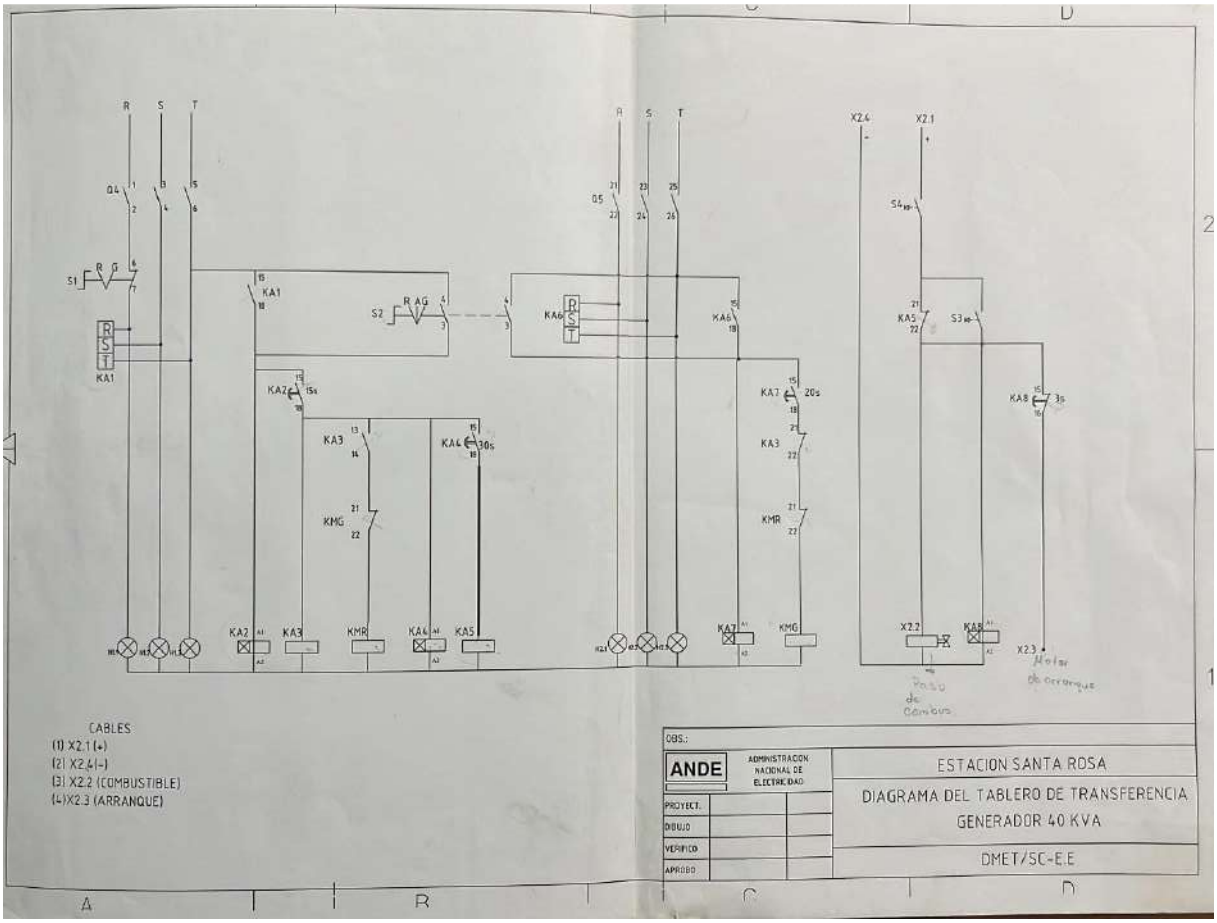


Figura 21.Diagrama del tablero de transferencia del generador de 40 kVA de la ES-SRO.

A.1.3. Esquema de protecciones del tablero de sistemas auxiliares de corriente alterna

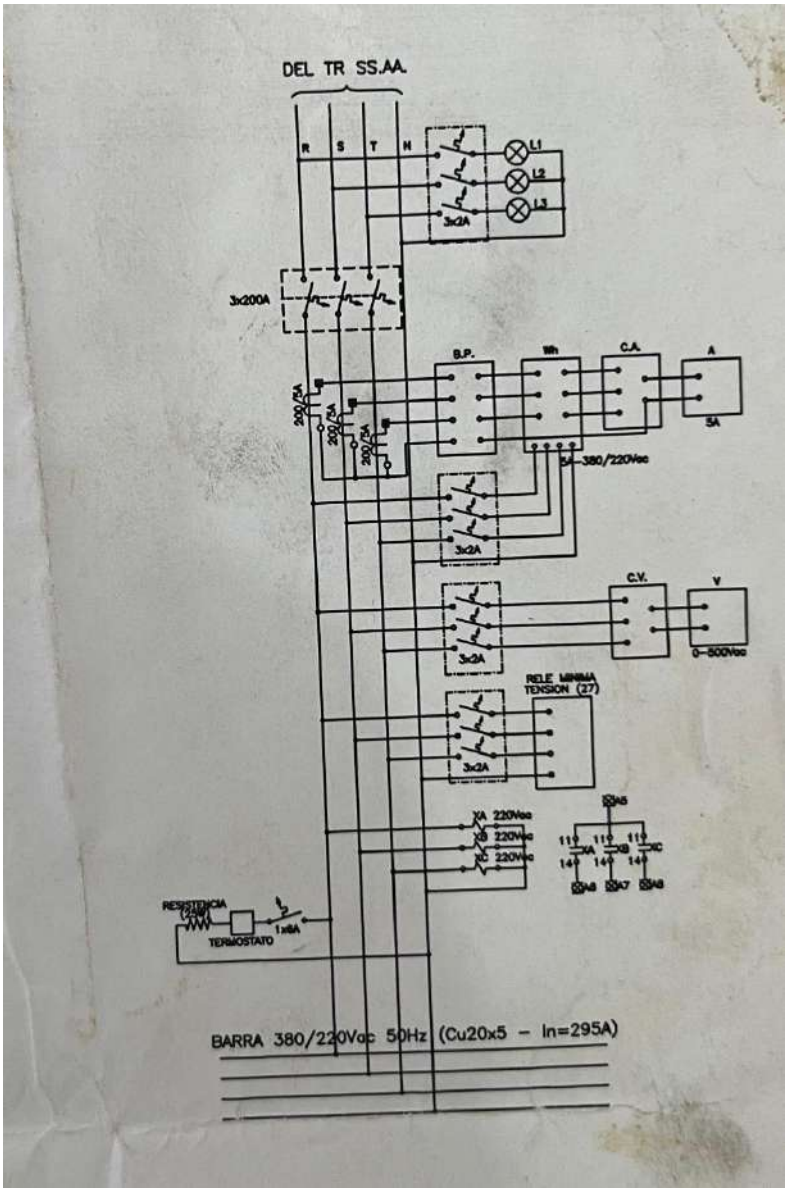


Figura 22. Esquema de protecciones del tablero de sistemas auxiliares de corriente alterna.

ANEXO 2

A.2. Sistema fotovoltaico

Se utiliza el software de simulación y análisis de sistemas fotovoltaicos *PVsyst* que se utiliza para diseñar, optimizar y evaluar el rendimiento de instalaciones solares. Este programa, en su versión 7.4.8, permite simular un sistema en la ubicación especifica de la "Estación Santa Rosa" en Paraguay. Se anexa el informe generado por *PVsyst* que proporciona información detallada sobre la producción de energía, los parámetros de diseño, las pérdidas del sistema y otros resultados clave. Se utiliza datos meteorológicos, como los proporcionados por Meteonorm 8.1, para simular con precisión el comportamiento del sistema fotovoltaico a lo largo del año. Además, permite el análisis de sombreado cercano y la evaluación del rendimiento del sistema mediante indicadores como la relación de rendimiento (PR).

El proyecto, ubicado en Paraguay, se caracteriza por ser un sistema fotovoltaico con paneles solares instalados sobre la edificación perteneciente a la ES-SRO. La ubicación geográfica se define con una latitud de -23.82°S y una longitud de -56.53°W, a una altitud de 168 metros y dentro de la zona horaria UTC-4. El sistema, con una potencia nominal de 20.80 kWp, se utiliza un albedo de 0.20 en los cálculos. El sistema está diseñado con paneles solares montados en un plano fijo con una inclinación de 30° y un azimut de 0° (inclinación optimizada para la mayor producción posible durante todo el año). Se emplea un sistema de sombreado lineal para el análisis de sombras cercanas. El sistema cuenta con 80 módulos fotovoltaicos (20 módulos en serie formando 4 cadenas) y 2 cargadores MPPT (Seguimiento del Punto de Máxima Potencia) con una potencia nominal total de 16.00 kWac, resultando en una relación de potencia DC/AC de 1.300. Las simulaciones arrojan una producción anual de energía de 34254 kWh, lo que equivale a una producción específica de 1647 kWh/kWp/año. Además, se alcanza una relación de rendimiento (PR) del 81.68%, lo que indica un buen desempeño del sistema.

Project summary

Geographical Site	Situation		Project settings	
ES SRO	Latitude	-23.82 °S	Albedo	0.20
Paraguay	Longitude	-56.53 °W		
	Altitude	168 m		
	Time zone	UTC-4		

Weather data
ES SRO
Meteonorm 8.1 (2006-2015), Sat=100% - Sintético

System summary

Grid-Connected System — **Tables on a building**

PV Field Orientation		Near Shadings		User's needs
Fixed plane		Linear shadings : Fast (table)		Unlimited load (grid)
Tilt/Azimuth	30 / 0 °			

System information

PV Array		Inverters	
Nb. of modules	80 units	Nb. of units	2 units
Pnom total	20.80 kWp	Pnom total	16.00 kWac
		Pnom ratio	1.300

Results summary

Produced Energy	34254 kWh/year	Specific production	1647 kWh/kWp/year	Perf. Ratio PR	81.68 %

Figura 23. Resumen de proyecto fotovoltaico.

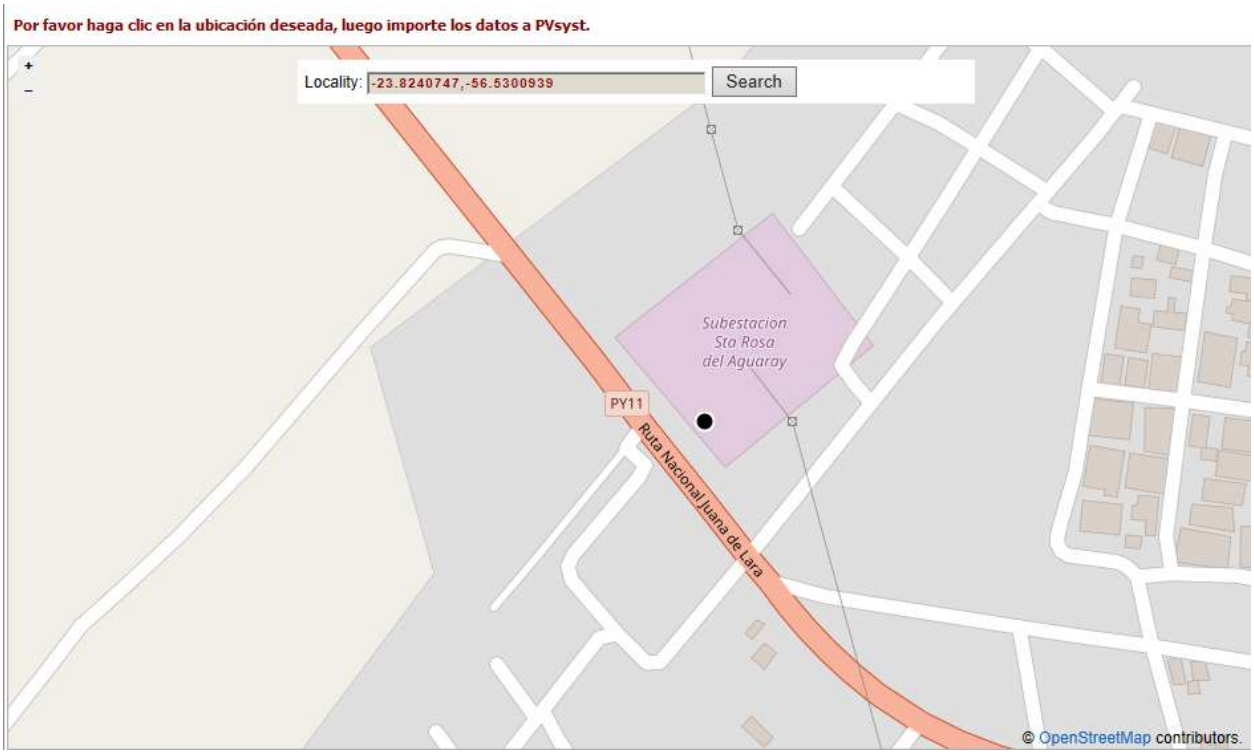


Figura 24. Ubicación del proyecto fotovoltaico.

General parameters

Grid-Connected System

Tables on a building

PV Field Orientation

Orientation	
Fixed plane	
Tilt/Azimuth	30 / 0 °

Sheds configuration	
Nb. of sheds	5 units
Sizes	
Sheds spacing	4.55 m
Collector width	2.00 m
Ground Cov. Ratio (GCR)	44.0 %
Top inactive band	0.02 m
Bottom inactive band	0.02 m

Models used	
Transposition	Perez
Diffuse	Perez, Meteonorm
Circumsolar	separate

Horizon
Free Horizon

Near Shadings
Linear shadings : Fast (table)

User's needs
Unlimited load (grid)

PV Array Characteristics

PV module	
Manufacturer	Generic
Model	LG 260 S1C-B3
(Original PVsyst database)	
Unit Nom. Power	260 Wp
Number of PV modules	80 units
Nominal (STC)	20.80 kWp
Modules	4 string x 20 In series
At operating cond. (50°C)	
Pmpp	18.71 kWp
U mpp	546 V
I mpp	34 A

Inverter	
Manufacturer	Generic
Model	(8kw,3 2 MPPT)
(Original PVsyst database)	
Unit Nom. Power	8.00 kWac
Number of inverters	4 * MPPT 50% 2 units
Total power	16.0 kWac
Operating voltage	200-800 V
Pnom ratio (DC:AC)	1.30
No power sharing between MPPTs	

Total PV power	
Nominal (STC)	21 kWp
Total	80 modules
Module area	131 m²
Cell area	115 m²

Total inverter power	
Total power	16 kWac
Number of inverters	2 units
Pnom ratio	1.30

Array losses

Thermal Loss factor	
Module temperature according to irradiance	
Uc (const)	20.0 W/m²K
Uv (wind)	0.0 W/m²K/m/s

DC wiring losses	
Global array res.	267 mΩ
Loss Fraction	1.5 % at STC

Module Quality Loss	
Loss Fraction	-0.8 %

Module mismatch losses	
Loss Fraction	2.0 % at MPP

IAM loss factor	
ASHRAE Param.: IAM = 1 - bo (1/cosi -1)	
bo Param.	0.05

Figura 25. Parámetros generales del sistema fotovoltaico

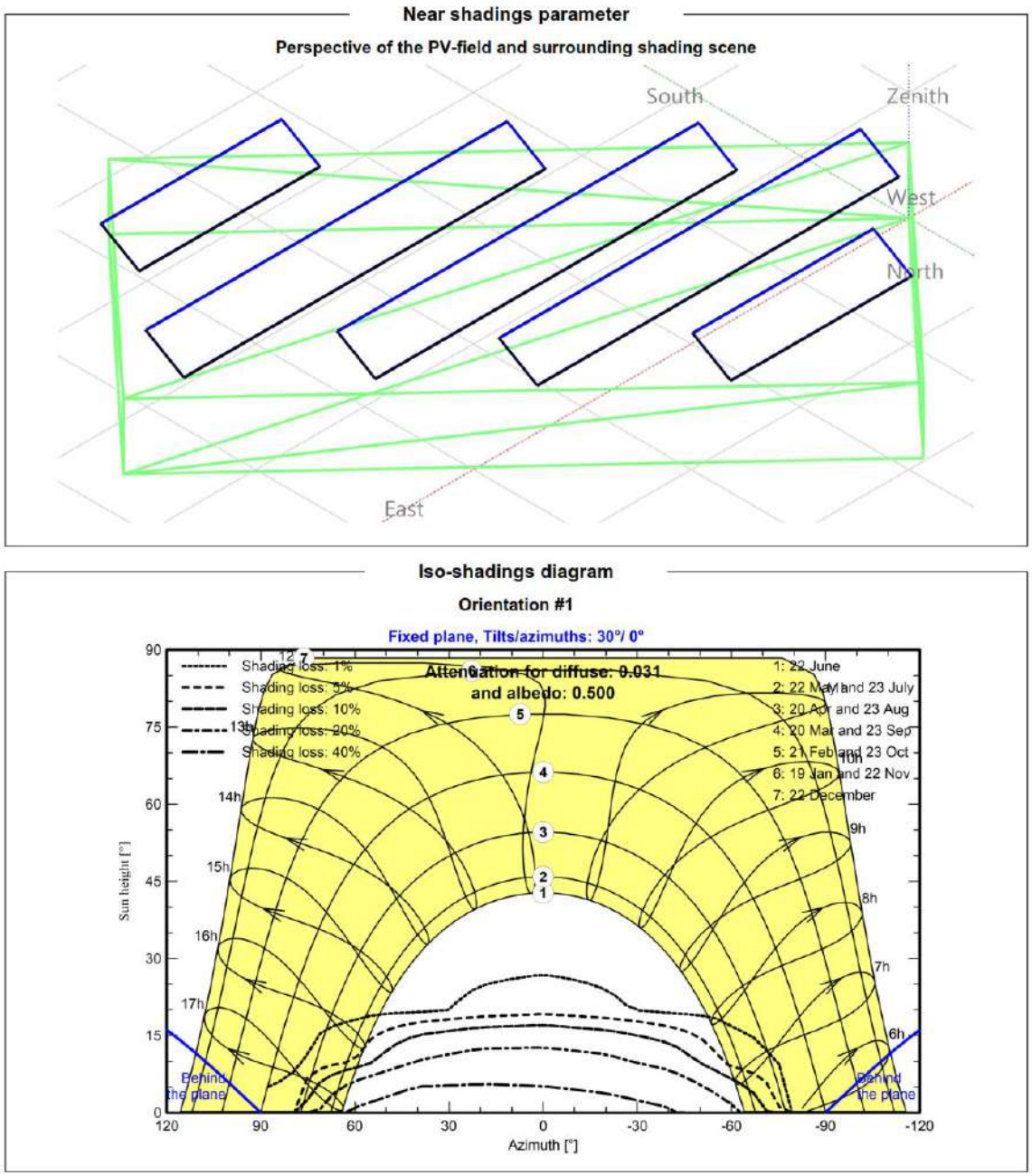


Figura 26. Vista 3D del sistema fotovoltaico y recorrido solar.

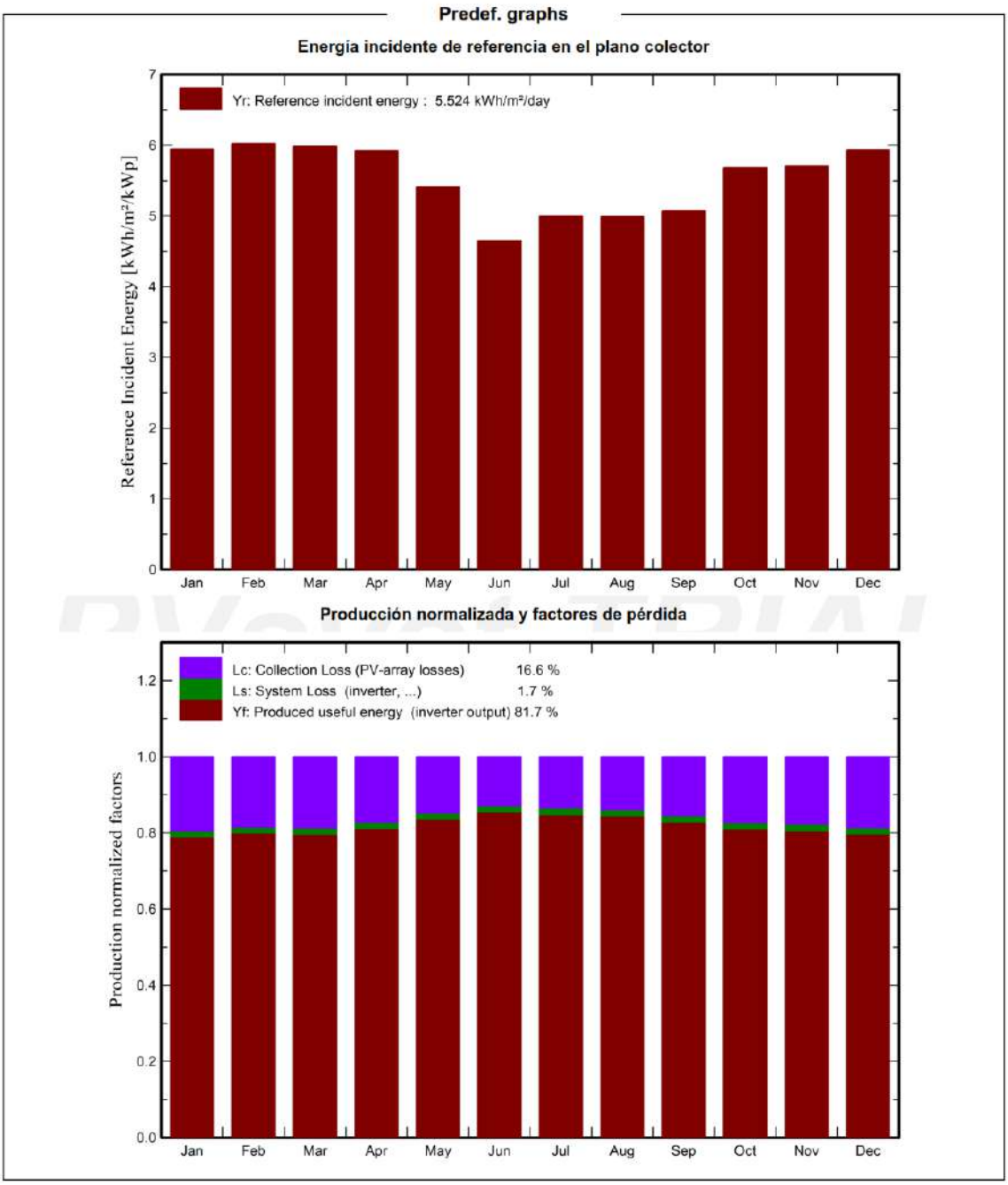


Figura 27. Energía incidente, producción normalizada y factores de pérdida

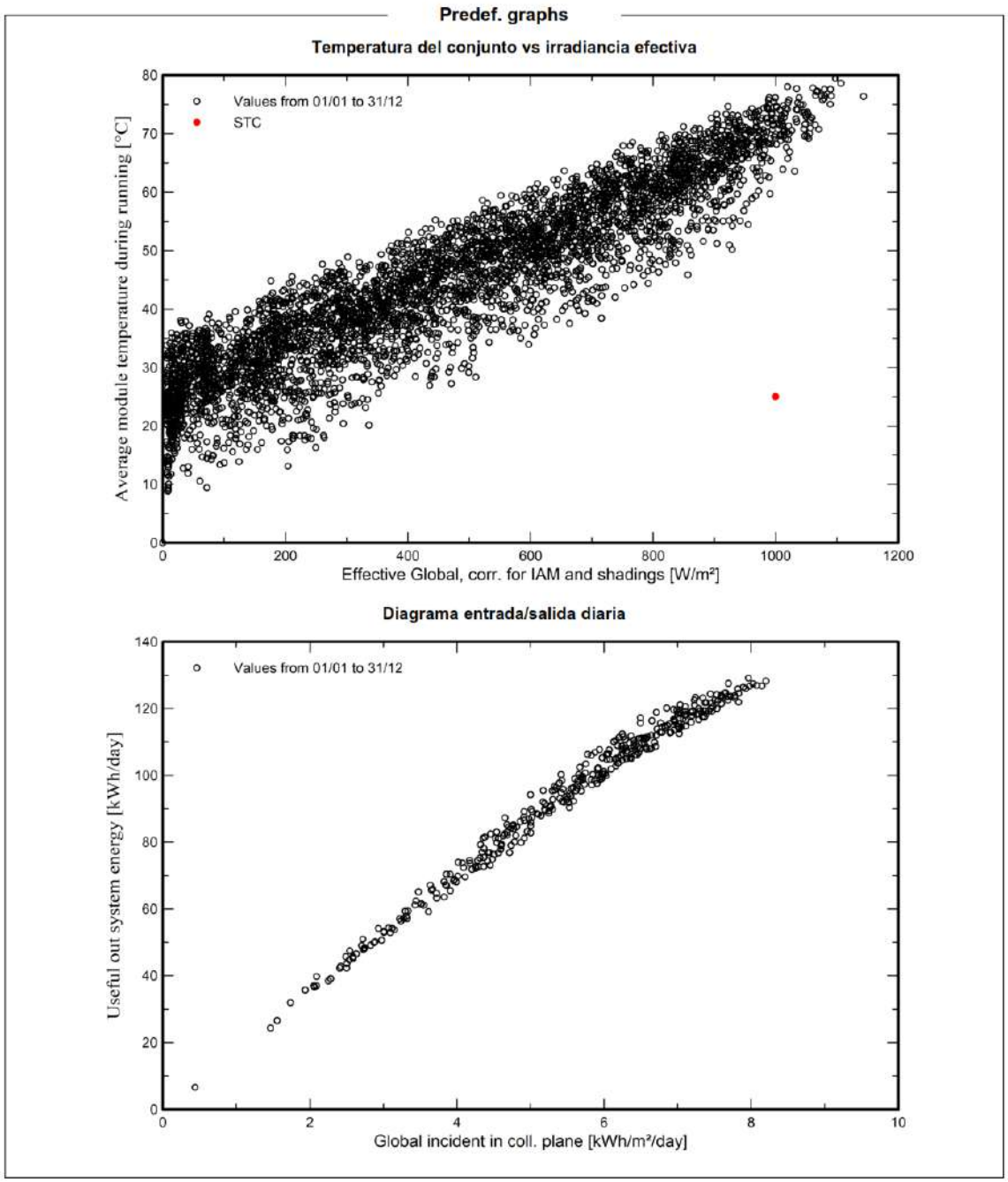


Figura 28. Temperatura del conjunto y Diagrama entrada/salida diaria.

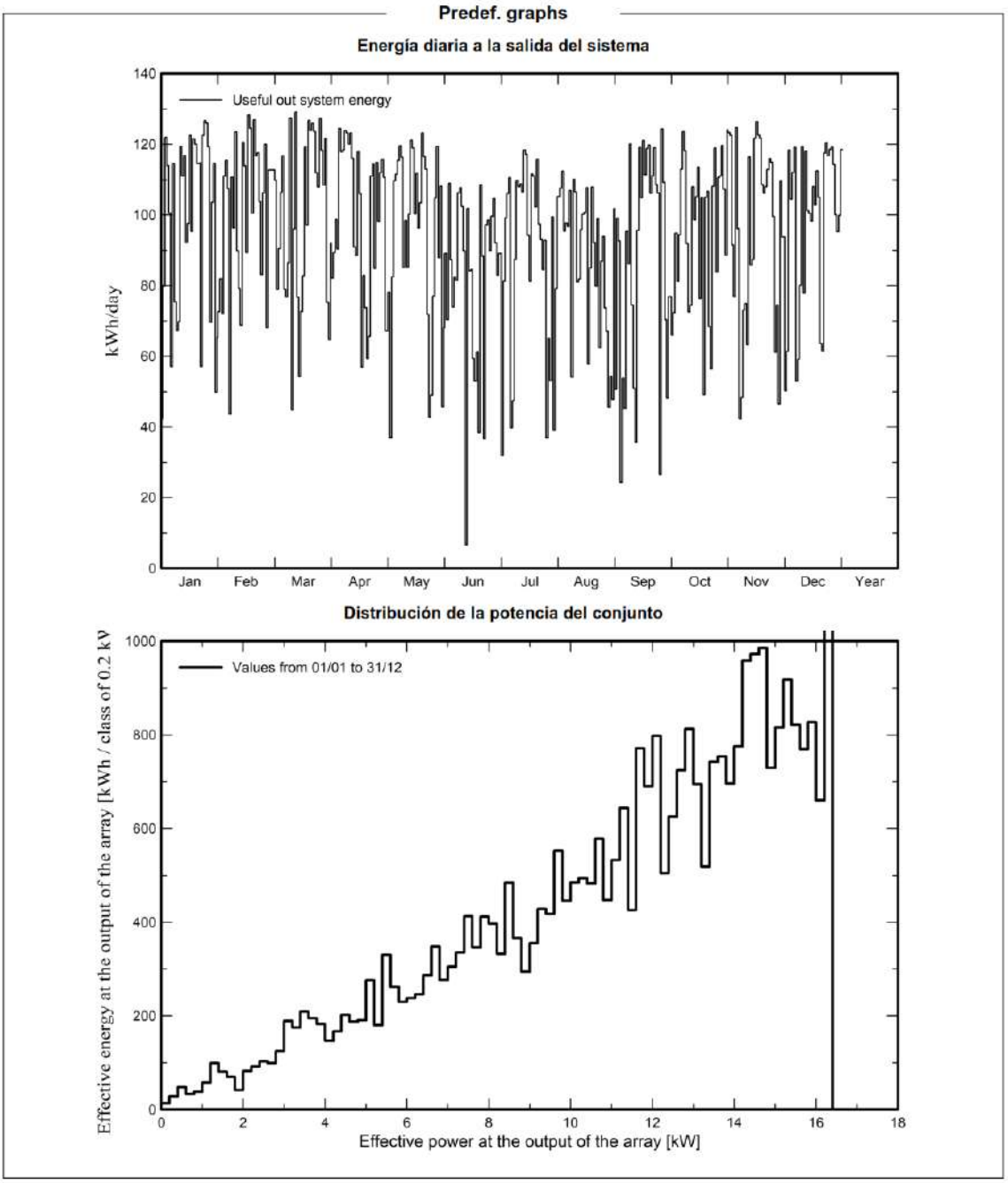


Figura 29. Energía diaria a la salida del sistema.

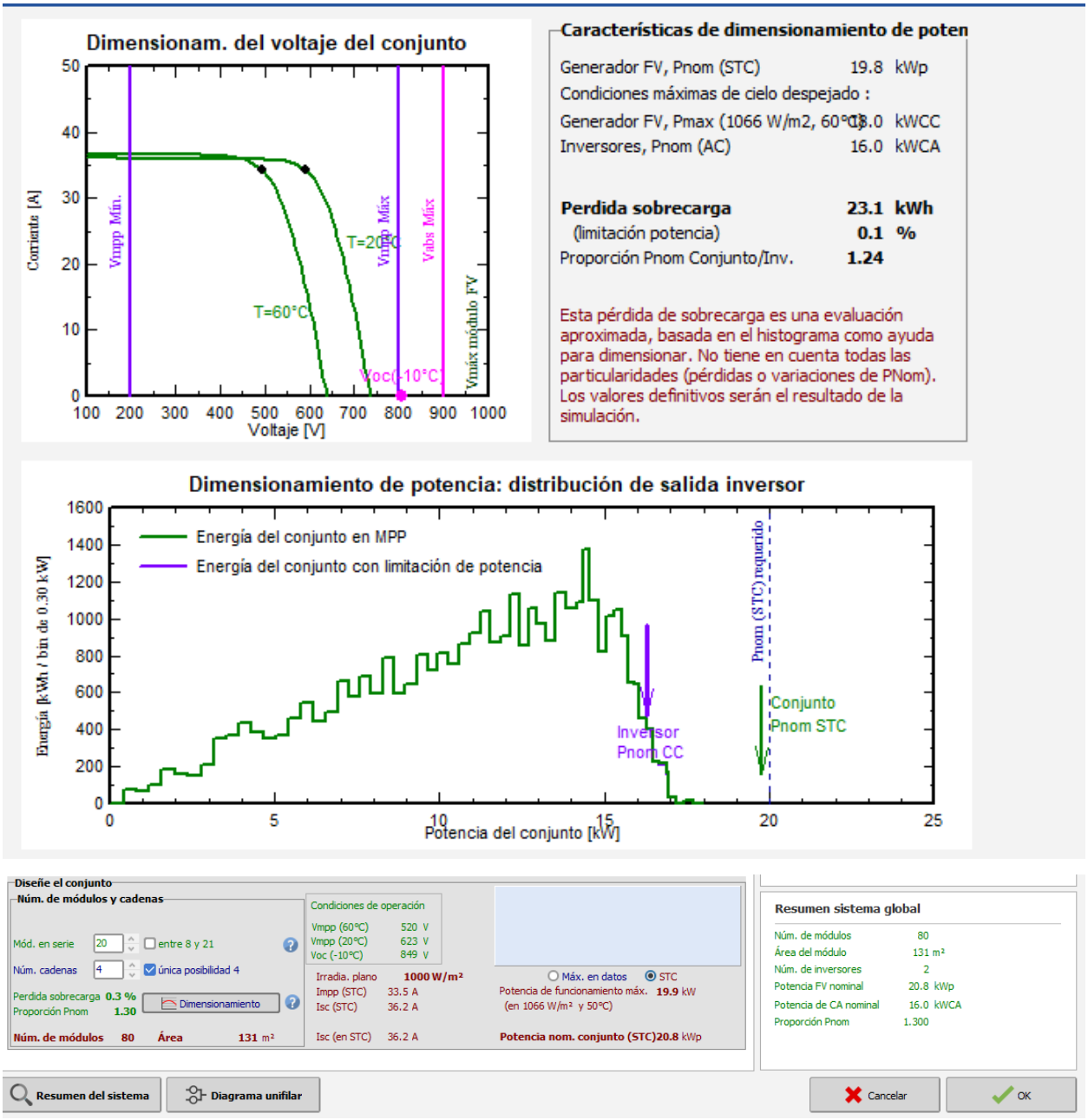


Figura 30. Dimensionamiento del voltaje del conjunto y distribución de salida del conjunto MPPT.

ANEXO 3

A.3. Características del rectificador presupuestado

MRC

Modular Rectifier and Battery Charger

Key Features

- Rectifier and Battery Charger that can be connected in parallel
- Multi-master Parallel Connection Technology
- Adjustable Output Voltage between 0V-1000VDC
- Parallel connection up to 16 units
- High power solution up to 10 MVA
- Equal Load Sharing
- Input Isolation Transformer
- Durable structure with thyristor technology
- Production at all industrial input voltages
- Ni-cd, Lead Acid and Stationary battery charging
- DC Earth Leakage protection
- Low Voltage / High Voltage protection
- Overload protection
- Over temperature protection
- Efficiency >% 95
- 7" Touchscreen Operator Panel
- Suitable design for industrial environment
- TS EN ISO 9001: 2015 Quality Certified

Optional Features

- ETHERNET and MOD-BUS RTU interface
- Battery Reverse Polarity Protection

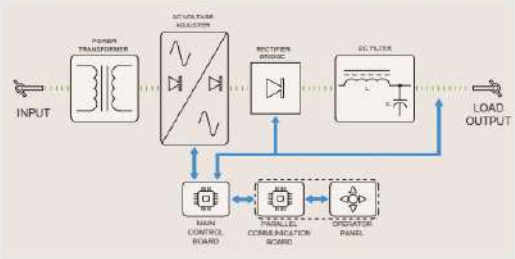
What is MRC Modular Rectifier and Battery Charger?

The MRC rectifier is designed for applications that require high power adjustable DC voltage. Many MRC rectifiers are connected in parallel to provide a very high power rectifier-charger solution. Output voltage and output current are adjustable between zero and nominal value.

It is suitable for using in projects that require High Power and High Current, in universal battery charging and DC supply applications that require adjustable output voltage and output current, in projects that need parallel connection and redundancy, and for industrial DC motor supply.

How does it work?

MRC modular rectifiers consist of Power Transformer, AC voltage adjusting unit, 3-phase Full-Bridge Diode rectifier unit, DC Filters and microprocessor based electronic control Boards.



Output voltage regulation in MRC modular rectifiers is done on the AC voltage side and with thyristors. The rectification process is done with a 3 phase Diode bridge. Since the voltage adjusting thyristors are switched at zero-crossings of the AC voltage, it does not generate harmonic distortion in the network voltage. Output filters keep DC voltage stable and at low ripple value.

MRC modular rectifiers have the parallel working feature. No external master unit or frame is required for parallel operation.

Microprocessor-based management board that is equipped with sensitive measuring circuits adjusts the output voltage and current values and keeps them constant.

Adjustable DC voltage needs at high powers up to 10 MegaWatts can be met with MRC modular rectifiers.

EDIT ELECTRONIC

Technical specifications

MRC Modular Rectifier and Battery Charger	
General Features	
Model	MRC
Technology	Parallel Connectable, Multi-master Rectifier and Charger
Number of Parallel Connection	It can be connected in parallel up to 16 units
Unit Power	50kva, 200kva
Input	
Rated Input Voltage	400VAC 3 Phase + Neutral + Ground (Different voltages are Optional)
Voltage Tolerance	+15 % , -15 %
Frequency	50 Hz. +/-%5 (60 Hz. Optional)
Output	
Nominal Output Voltage	Between 0VDC-1000VDC determined at order
Voltage Tolarance	+/-%2
Voltage Adjustment	It can be adjusted between 0% - 100%xV nominal
Soft Start	Adjustable between 0 – 30 seconds
Current Adjustment	Adjustable between 2% - 100%xI nominal
Charging Mode	Constant Voltage/Constant Current, Boost Charge, Float Charge
Efficiency	85% - 95% (Depends on device specifications)
Response Time	20 msec
Correction Time	100 msec - 200 msec
Protection Functions	
Over Temperature Protection	Fan cooling works at 50C. At 80C, the power to the load is cut.
Surge Arrester	Class-I or Class-II (optional)
Earth Leakage Protection	It monitors the isolation between DC(+) or DC(-) and ground. It gives an alarm in case of leakage.
Management Monitoring and Communication Interfaces	
Touchscreen Operator Panel	7" Touch Color screen, Input Voltage, Output Voltage, Output Current, Boost Voltage, Float voltage, Boost Timer, Date-time, Status and Fault information, Parameter settings
Remote Management Interface (optional)	Browser-based remote management with Ethernet connection MOD-BUS RTU with RS485 connection
Environmental Conditions	
Operating temperature	-10 °C - +40 °C
Altitude Operating Height	1.500m
Humidity	90% none condensed
Acoustic Noise	< 55dB (at 1m distance and doors closed)
Cabinet Specifications	
Type-Protection Class	Free Standing Modular Cabinet, IP21 Indoor type (IP54 and higher protection class, Outdoor Type Cabinets are optional)
Paint-Color	Epoxy-Polyester Powder Paint - RAL 7035
Cooling	Air cooling with thermostat controlled fan.

ANEXO 4

A.4. Características del cuadro de Alarmas

A.4.1. Especificación técnica según ANDE [14]

El sistema deberá permitir la señalización y el registro, tanto de manera local como remota, de fallas y/o eventos en subestaciones de generación y transmisión. Para cumplir con este objetivo, la unidad deberá contar con al menos 32 canales de entrada o monitoreo de señales, cada uno con sus respectivos dispositivos de señalización óptica y acústica, los cuales se activarán al detectar umbrales predeterminados, ya sea por el cierre o la apertura de contactos de campo (110 Vcc) como resultado de eventos externos en las entradas del cuadro.

Además de la señalización local, el sistema deberá ser capaz de almacenar internamente la secuencia de los últimos 1,000 eventos detectados, con el fin de posibilitar su posterior transmisión y procesamiento mediante un sistema de adquisición y gestión de datos. Para esto, el anunciador deberá contar con una interfaz serial RS-232C y el software correspondiente para un entorno Windows. De manera opcional, también podrá incluir una interfaz RS-485.

A.4.2. Cuadro de Alarmas seleccionado

En base a la Especificación Técnica [14] se elige un Anunciador de Alarmas modelo ANTRON II que se muestra en la Figura 31.

La principal finalidad de este equipo es monitorear las condiciones del sistema de corriente continua, señalando la ocurrencia de situaciones anormales.

Al ser un equipo microprocesado, ofrece la función de comunicación, la cual es esencial para la automatización dentro de la estación.

Posee una memoria con batería interna, lo que hace que aun sin alimentación no se pierdan los datos.

Figura 31. Anunciador de alarmas ANTRON II.

A.4.2.1. Descripción de funcionamiento

El anunciador recibe señales provenientes de la actuación de los contactos eléctricos externos asociados al sistema auxiliar de corriente continua vía contactos NA iniciadores de su lógica, procesando la secuencia especifica.

Los puntos monitoreados entran en el cuadro de alarmas a través de placas periféricas, cada una de estas placas puede recibir señales de hasta 8 puntos externos.

Todas las placas periféricas están conectadas en una placa de leds. En esta misma placa están conectadas las tensiones de referencia.

La placa CPU recibe señales de todas las periféricas, procesa las informaciones y los guarda en la memoria.

Siempre que la bocina interna actúa, el contacto del relé repetidor de bocina cambia de estado, posibilitando la actuación de otra señalización.

Si hubiera falla en la alimentación CC, el contacto del relé repetidor de falla CC cambia de estado, posibilitando la actuación de otra señalización como una bocina externa, al mismo tiempo que una señalización visual se enciende.

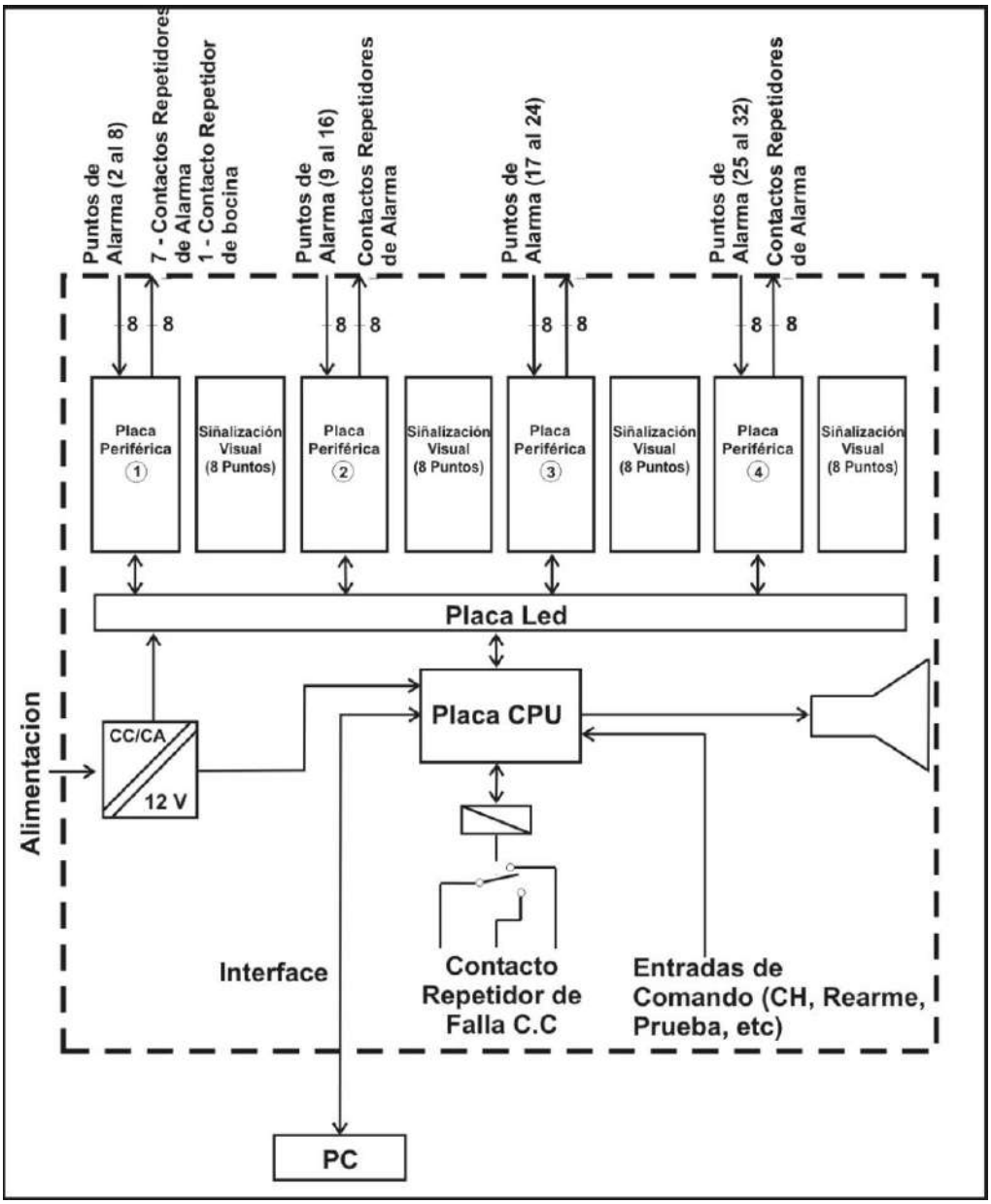


Figura 32. Diagrama de bloques del Cuadro de Alarmas.