

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



**Desarrollo y puesta en marcha de transferencia automática  
en media tensión, con control de inyección fotovoltaica**

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por  
Samuel André Álvarez Camacho para optar al grado  
académico de Licenciado en Ingeniería Electrónica

Guatemala,

2024



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería




**Desarrollo y puesta en marcha de transferencia automática  
en media tensión, con control de inyección fotovoltaica**

Trabajo de graduación presentado por Samuel André Alvarez  
Camacho para optar al grado académico de Licenciado en  
Ingeniería Electrónica

Guatemala,


2024


Vo.Bo.:

(f)   
Ing. Marvin Najarro

Tribunal Examinador:

(f)   
Ing. Marvin Najarro

(f)   
Ing. Gabriel Velásquez

(f)   
M. Sc. Carlos Esquit

Fecha de aprobación: Guatemala, 6 de enero de 2025

---

## Prefacio

---

Durante mis años de estudio en la carrera de ingeniería, tuve la oportunidad de explorar diversas áreas del conocimiento técnico y científico. Cursé una variedad de materias que captaron mi interés, desde la electrónica hasta la programación, pero hubo una en particular que me impactó profundamente por su aplicabilidad en el mundo real: automatización industrial. Este curso no solo me fascinó, sino que también me reveló un vasto potencial para mi futuro en el ámbito laboral, donde la industria y la tecnología se entrelazan para optimizar procesos y mejorar la eficiencia.

En el curso de automatización industrial, adquirí conocimientos sobre cómo los sistemas automatizados pueden transformar las operaciones industriales. Aprendí a diseñar y a implementar soluciones que permiten a las empresas operar de manera más inteligente y efectiva. Estas habilidades me proporcionaron una base sólida y me hicieron darme cuenta de que quería enfocar mi carrera en esta área, donde la ingeniería se convierte en una herramienta para resolver problemas reales.

Cuando llegó el momento de buscar una empresa para realizar mis prácticas profesionales, tuve claro que debía encontrar una compañía que me permitiera aplicar y ampliar estos conocimientos en un entorno real. No buscaba una industria específica, sino una empresa que tuviera un alcance más amplio, una que proporcionara soluciones tecnológicas a diversas industrias en todo el país. Así fue como encontré la empresa perfecta: ESINSA. Desde el primer momento, me sentí atraído por su enfoque en la venta y distribución de equipos eléctricos industriales y servicios de automatización, así como por su reputación en el mercado.

Fui aceptado en ESINSA para realizar las prácticas, y desde el inicio, supe que era el lugar ideal para desarrollar mis habilidades. Durante ese tiempo, trabajé junto a un equipo de ingenieros altamente capacitados, quienes no solo se dedicaban a vender productos, sino que también ofrecían soluciones personalizadas a las necesidades de cada cliente. Aprendí cómo una empresa como ESINSA se convierte en un socio estratégico para las industrias, proporcionando desde componentes eléctricos hasta sistemas complejos de automatización.

Mi experiencia en ESINSA fue muy enriquecedora. Tuve la oportunidad de participar en la creación de soluciones para algunas de las industrias más importantes del país. Contribuí en el diseño y desarrollo de ensambles personalizados que cubrieron las necesidades específicas de los clientes. Entre los proyectos en los que trabajé, destacó la creación de centros de control de motores para una industria textil, así como el diseño de bancos de capacitores para varias industrias. Cada proyecto representó un desafío único que me permitió aplicar mis conocimientos teóricos en situaciones prácticas y aprender de la experiencia directa.

Al finalizar mi período de prácticas, la empresa me ofreció un puesto de trabajo, una oportunidad que acepté con entusiasmo. Sabía que ESINSA era el lugar donde quería construir mi carrera profesional. El puesto que se me ofreció era exactamente lo que estaba buscando: un rol que me permitiera ser el enlace entre el cliente y los procesos internos de la empresa. Me dediqué a la fabricación de soluciones personalizadas, a la elaboración de presupuestos, y mantuve contacto constante con todas las áreas de la empresa, desde la parte administrativa, pasando por el taller, hasta la ingeniería de aplicaciones y procesos.

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento. En primer lugar, a mi familia, especialmente a mi padre, quien ha sido el pilar más importante en mi vida. Su apoyo incondicional ha sido fundamental para alcanzar mis metas y sin su ayuda, no habría llegado a donde estoy hoy. En segundo lugar, quiero agradecer a ESINSA por brindarme la oportunidad de formar parte de un proyecto tan significativo y por permitirme presentarlo como mi trabajo de graduación. Trabajar en este proyecto me ha permitido crecer profesionalmente y fortalecer mis habilidades en el ámbito de la automatización industrial.

Finalmente, quiero expresar mi agradecimiento a la dirección de ingeniería electrónica, mecatrónica y biomédica de mi universidad. Su apoyo a lo largo de los años ha sido crucial para mi formación académica y profesional. Quiero agradecer especialmente al ingeniero Carlos Esquit, por su guía y apoyo incondicional, así como a Lésly Gómez, quien ha desempeñado su trabajo de manera excepcional, brindándome el respaldo necesario en todo momento. Siempre me sentí apoyado y motivado por parte de ellos, y su influencia ha sido determinante en mi desarrollo como ingeniero.

<b>Prefacio</b> .....	<b>IV</b>
<b>Índice</b> .....	<b>V</b>
<b>Lista de figuras</b> .....	<b>VII</b>
<b>Lista de cuadros</b> .....	<b>IX</b>
<b>Resumen</b> .....	<b>X</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>XI</b>
<b>1 Introducción</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Antecedentes</b> .....	<b>3</b>
<b>3 Justificación</b> .....	<b>5</b>
<b>4 Objetivos</b> .....	<b>7</b>
4.1 Objetivo general .....	7
4.2 Objetivos específicos .....	7
<b>5 Alcance</b> .....	<b>8</b>
<b>6 Marco teórico</b> .....	<b>9</b>
6.1 Niveles de tensión y el empleo práctico de la media tensión .....	9
6.2 Celdas de media tensión .....	11
6.2.1 Celdas SM6 .....	12
6.3 Transferencias automáticas .....	14
6.3.1 Operaciones de transición abierta .....	15
6.3.2 Operaciones de transición cerrada .....	17

6.4	Generadores de emergencia .....	18
6.5	Páneles fotovoltaicos .....	18
6.6	Lenguaje de programación Ladder .....	21
6.7	PLC Modicon TM221CE40T .....	22
6.7.1	Módulo de expansión TM3DM8R.....	24
6.7.2	Protolo de comuniación Modbus .....	24
6.7.3	Protocolo TCP/IP .....	25
6.7.4	Conmutador ethernet TCSESU053FN0.....	26
6.8	Terminal HMISTU655.....	27
<b>7</b>	<b>Resultados.....</b>	<b>28</b>
7.1	Disposición física del gabinete de control .....	28
7.2	Diagrama de flujo del sistema.....	29
7.2.1	Principios de operación.....	29
7.2.2	Tiempos para generador.....	31
7.3	Programación de celdas para transferencia.....	34
7.3.1	Control de celdas.....	34
7.3.2	Programación de ATS .....	36
7.3.3	Programación de operación normal .....	36
7.3.4	Operación de emergencia.....	38
7.3.5	Ejercitación del generador y contador de eventos .....	40
7.3.6	Pantallas HMI .....	41
7.4	Puesta en marcha .....	44
<b>8</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>46</b>
<b>9</b>	<b>Recomendaciones .....</b>	<b>48</b>
<b>10</b>	<b>Referencias.....</b>	<b>50</b>
<b>11</b>	<b>Anexos .....</b>	<b>53</b>

---

## Lista de figuras

---

Figura 1. Tren de celdas SM6, de la marca Schneider Electric . . . . .	12
Figura 2. Elemento interruptor en celdas SM6 de Schneider Electric . . . . .	13
Figura 3. Transferencias automáticas serie 300, marca ASCO Power Technologies	14
Figura 4. Posición de los contactos durante una reconexión en transición abierta .	16
Figura 5. Salida de voltaje del interruptor de transferencia a las cargas durante la conmutación de transición abierta . . . . .	16
Figura 6. Posición de los contactos durante una reconexión en transición cerrada .	17
Figura 7. Salida de voltaje del interruptor de transferencia a las cargas durante la conmutación de transición cerrada . . . . .	17
Figura 8. Sección de granja solar ubicada en planta de agroproductos en Palín, Escuintla, Guatemala . . . . .	19
Figura 9. Esquema de un sistema fotovoltaico conectado a la red . . . . .	21
Figura 10. Ejemplo básico de programación en ladder . . . . .	22
Figura 11. PLC Modicon TM221CE40T de Schneider Electric . . . . .	23
Figura 12. Módulo de expansión TM3DM8R de Schneider Electric . . . . .	24
Figura 13. Diagrama del protocolo TCP/IP usando el modelo OSI como referencia	26
Figura 14. Conmutador Ethernet de Schneider Electric . . . . .	26
Figura 15. Pantalla HMISTU655 de Schneider Electric . . . . .	27
Figura 16. Disposición física del gabinete de control . . . . .	28
Figura 17. Sección del diagrama unifilar de la instalación en media tensión. . . .	31
Figura 18. Disposición de las celdas de media tensión . . . . .	31
Figura 19. Diagrama de flujo de operaciones . . . . .	33
Figura 20. Programación de control de celda GESUR . . . . .	34
Figura 21. Programación de control de celda generador . . . . .	35
Figura 22. Programación de transferencia automática . . . . .	36
Figura 23. Programación de procesos de operación normal . . . . .	37
Figura 24. Programación de procesos de operación de emergencia . . . . .	39
Figura 25. Programación para ejercitación semanal del generador . . . . .	40
Figura 26. Contador de eventos y comando de encendido de prueba de genrador	40

Figura 27.	Pantalla principal HMI . . . . .	42
Figura 28.	Pantalla de temporizadores . . . . .	42
Figura 29.	Pantalla de entradas y salidas . . . . .	42
Figura 30.	Ejemplo de pantallas en proceso de reconexión . . . . .	43
Figura 31.	Ejemplo de pantallas en operación normal . . . . .	43
Figura 32.	gabinete de control en pruebas . . . . .	53
Figura 33.	Inicio de trabajos de montaje de tren de celdas . . . . .	54
Figura 34.	Trabajos de conexión entre celdas . . . . .	54
Figura 35.	Instalación de fusibles en celdas de salida . . . . .	54
Figura 36.	interior de celda de salida tipo desconectador con fusible . . . . .	55
Figura 37.	Realización de pruebas de resistencia en fusibles . . . . .	56
Figura 38.	Tren de celdas instalado en cuarto eléctrico de centro comercial . . . .	56
Figura 39.	Energización de tren de celdas . . . . .	57

---

## Lista de cuadros

---

Cuadro 1. Voltajes estándar nominales de sistemas trifásicos según ANSI C84.1-1989 . . . . .	10
Cuadro 2. Tipos de operación según las condiciones del relé GESUR. . . . .	29
Cuadro 3. Tiempos para secuencias de generador. . . . .	32
Cuadro 4. Señales para control de celdas y generador. . . . .	34
Cuadro 5. Registro de eventos de prueba de operación de emergencia . . . . .	44
Cuadro 6. Registro de eventos de prueba de detección de tensión en GESUR . .	44
Cuadro 7. Registro de eventos de prueba de operación de emergencia . . . . .	44

Este trabajo presenta el desarrollo y la implementación de un sistema de transferencia automática en media tensión con control de inyección fotovoltaica para un centro comercial en el sur de la Ciudad de Guatemala. La necesidad de este proyecto surgió a raíz de una falla catastrófica en el sistema de transferencia existente, lo que llevó al centro comercial a buscar un reemplazo moderno capaz de manejar media tensión (13.8 KV) para asegurar la continuidad del servicio eléctrico con rapidez para normalizar sus operaciones.

El proyecto involucra el diseño de un sistema de transferencia controlado por un *Controlador Lógico Programable (PLC)* que gestiona la operación de dos celdas de media tensión. La celda primaria recibe energía del proveedor local, *GESUR*, mientras que la celda secundaria está conectada a un generador de emergencia. Además, el sistema incluye una celda fotovoltaica que se desconecta durante interrupciones en el servicio de *GESUR* para evitar problemas de desincronización.

Los objetivos principales incluyen desarrollar la disposición física del gabinete del *PLC*, programar el *PLC* para controlar ambas celdas de media tensión y la celda fotovoltaica, y crear una *Interfaz Hombre-Máquina (HMI)* para monitorear el estado del sistema y las alarmas. La metodología abarca el desarrollo de diagramas de flujo, la programación del *PLC*, y las pruebas y ajustes en tiempo real del sistema.

El proyecto fue entregado al centro comercial funcional dentro del tiempo previsto para su culminación. El centro comercial ahora cuenta con una subestación en media tensión nueva y automatizada, tomando en cuenta todos los aspectos de seguridad, especialmente en cuanto al sistema de emergencia se refiere. La lógica de programación utilizada garantiza el funcionamiento seguro y confiable de la transferencia de emergencia y el aislamiento de la inyección fotovoltaica.

Palabras clave: transferencia automática, media tensión, inyección fotovoltaica, PLC, GESUR, HMI.

---

## Abstract

---

This work presents the development and implementation of an automatic medium-voltage transfer system with photovoltaic injection control for a shopping mall in the southern area of Guatemala City. The need for this project arose as a result of a catastrophic failure in the existing transfer system, which led the shopping mall to seek a modern replacement capable of handling medium voltage ( $13.8\text{ KV}$ ) to ensure continuity of electrical service and quickly restore operations.

The project involves the design of a transfer system controlled by a *Programmable Logic Controller (PLC)* that manages the operation of two medium-voltage switchgear cells. The primary cell receives power from the local utility provider, *GESUR*, while the secondary cell is connected to an emergency generator. Additionally, the system includes a photovoltaic cell that disconnects during outages in *GESUR*'s service to prevent synchronization issues.

The main objectives include developing the physical layout of the *PLC* cabinet, programming the *PLC* to control both the medium-voltage switchgear cells and the photovoltaic cell, and creating a *Human-Machine Interface (HMI)* to monitor system status and alarms. The methodology covers the development of flow diagrams, *PLC* programming, and real-time testing and adjustments of the system.

The project was delivered to the shopping mall fully functional within the scheduled completion time. The mall now has a new, automated medium-voltage substation, incorporating all safety aspects, especially concerning the emergency system. The programming logic used ensures safe and reliable operation of the emergency transfer and isolation of the photovoltaic injection.

Keywords: automatic transfer, medium voltage, photovoltaic injection, PLC, GESUR, HMI.

# CAPÍTULO 1

---

## Introducción

---

La continuidad del servicio eléctrico es crucial para el funcionamiento eficiente de los centros comerciales, especialmente aquellos de gran tamaño y alto consumo energético. En el sur de la Ciudad de Guatemala, un importante centro comercial enfrentó recientemente una falla catastrófica en su sistema de transferencia automática de emergencia, lo que causó graves daños en su acometida de celdas de media tensión y afectó significativamente sus operaciones. Debido a esto, se encomendó la tarea de instalar un nuevo tren de celdas y programar la transferencia automática.

Este tipo de situaciones son críticas para cualquier instalación, ya que la falta de energía puede tener consecuencias graves para la operación del negocio. En ese contexto, se solicitó al responsable del desarrollo del presente proyecto que solucionara el problema de manera rápida y efectiva. Este proyecto representó una oportunidad única para aplicar los conocimientos adquiridos a lo largo de la formación académica, y al mismo tiempo, llevar a cabo un proyecto de gran envergadura que pudiera ser utilizado como trabajo de graduación.

Se solicitó permiso para utilizar este proyecto como base para el trabajo de tesis, y con el apoyo de la empresa, se concedió la autorización. El desarrollo del sistema no solo permitió aplicar conocimientos técnicos, sino que también implicó la gestión de un proyecto complejo, desde la fase de diseño hasta la implementación y el seguimiento. Fue una experiencia que consolidó habilidades profesionales y preparó al responsable para enfrentar desafíos similares en el futuro.

El tren de celdas que tenía el centro comercial estaba constituido por dos celdas de acometida en media tensión con interruptores motorizados y seccionadores en SF<sub>6</sub>, que conformaban la transferencia automática anterior, una celda de acometida con seccionador en SF<sub>6</sub> y protección por fusibles, para alimentar el sistema con una granja solar de 700 KVA, y siete celdas de salida con seccionador en SF<sub>6</sub> que alimentan distintos

transformadores reductores en distintos cuartos eléctricos repartidos en el centro comercial.

Las celdas de media tensión son equipos de protección eléctrica. Son el equivalente de los interruptores termomagnéticos, pero para proteger principalmente los transformadores que van a alimentar una instalación eléctrica.

Las inyecciones solares, por otro lado, son la alimentación eléctrica que se obtiene de un sistema fotovoltaico. Es un grupo de paneles solares que inyectan energía eléctrica a la infraestructura eléctrica.

Las celdas de acometida que conformaban la ATS eran alimentadas de la siguiente forma: la celda de acometida principal se alimentaba desde la calle por el proveedor de servicios de electricidad *GESUR*. La celda de acometida de emergencia se alimentaba por un generador de emergencia diésel de 900 kW.

No se pudo confirmar la causa de la falla debido a restricciones de presupuesto y tiempo, ya que el centro comercial no aprobó una investigación exhaustiva. No obstante, la principal sospecha apuntaba a la inyección fotovoltaica. Se consideró la posibilidad de que, durante un corte de energía, las ondas de voltaje del generador y de la inyección solar hubieran entrado en desfase, tomando como peor escenario un desfase de  $180^\circ$ . Un desfase de tal magnitud implicaría una diferencia de potencial de 27.6 kV, lo que supera los 24 kV de aislamiento soportados por las celdas de media tensión instaladas.

Ante esta sospecha, se decidió incluir en el desarrollo de la transferencia el control de la inyección solar, de modo que, en caso de un corte de energía, la inyección solar se desconectase del sistema, eliminando así el riesgo de un nuevo desfase. Por lo tanto, el proyecto se centró en integrar las celdas motorizadas y controlarlas mediante un *PLC*, tomando en cuenta la inyección solar.

Es importante mencionar que una transferencia automática no solo hace la maniobra ante un corte de energía en la fuente principal. Esta también se encarga de enviar la señal de arranque al generador de emergencia. Esto trae a la mesa información relevante sobre el generador, ya que el centro comercial no contaba con un sistema de control integrado. El control debía realizarse desde el mismo *PLC* que comandaría la transferencia. De esta forma, se programaron en el *PLC* los temporizadores necesarios para seguir el protocolo de arranque en caso de emergencia. Además de dicho protocolo, también se programó la ejercitación semanal del generador. Los generadores de emergencia deben arrancar periódicamente para asegurar que estén preparados ante un corte de energía. Con estos ejercicios, el equipo de mantenimiento puede monitorear posibles fallas y anticiparse a ellas.

## CAPÍTULO 2

---

### Antecedentes

---

Antes de la ejecución de este proyecto, el centro comercial tenía un tren de nueve celdas en media tensión. De esas nueve celdas, tres eran celdas de acometida y las seis restantes eran celdas de salida para alimentar distintos cuartos eléctricos distribuidos a lo largo del centro comercial. Este arreglo de celdas era igual al usado en este proyecto. Las tres celdas de acometida eran alimentadas por: granja solar de 700 KVA, generador de emergencia y GESUR. GESUR es la distribuidora de energía de la región. La media tensión es suministrada en 13.8 KV por GESUR para industrias, además de distribuir la baja tensión para viviendas y edificaciones que no demanden media tensión. La conexión de la distribución de GESUR y la celda de acometida principal se daba por medio de fusibles de línea que conectan la media tensión de los postes directo a la celda de acometida. De las celdas de acometida, las celdas de GESUR y del generador de emergencia son las que conforman la transferencia de media tensión controlando los interruptores motorizados de las celdas. La celda de acometida de la inyección fotovoltaica no contaba con interruptor motorizado, por lo que no era posible automatizar la apertura y cierre de la celda. La transferencia automática en la entrada del tren de celdas original era totalmente funcional. Era capaz de conmutar entre ambas fuentes de energía, pero por las características de la celda, se detectó que no ejercía control sobre la inyección solar. Sin importar qué fuente era la que estaba suministrando la energía, el sistema fotovoltaico suministraba energía constantemente. Posterior a la falla del tren de celdas se hizo un levantamiento para hacer la cuantificación de los daños y detectar las posibles causas de la falla. La distribución física de las celdas se puede ver en la sección de resultados.

Durante esos levantamientos se intentó ingresar al PLC, de la marca Schneider Electric, por medio de la conexión serial para descargar el programa, pero no fue posible debido a los daños provocados. Se consultó al centro comercial si existía una copia de la programación de la transferencia o documentación como manuales de uso o de parametrización, pero no fue posible encontrar alguna documentación. Dado que no se tuvo acceso a la programación

original, no se puede asegurar que la programación contara con las redundancias de seguridad necesarias para evitar que ambas fuentes de energía estuvieran suministrando energía al mismo tiempo.

---

### Justificación

---

Las transferencias automáticas son arreglos de interruptores que permiten conectar una misma carga a dos fuentes de energía diferentes. En caso de que la fuente de energía primaria falle, el sistema de transferencia realiza automáticamente el cambio a la fuente de energía secundaria, asegurando así la continuidad del suministro eléctrico. Este tipo de sistema es fundamental en instalaciones donde una interrupción eléctrica representa una pérdida económica o un riesgo operativo significativo. El arreglo más común en una transferencia automática es que la fuente principal provenga del proveedor local de energía eléctrica, mientras que la fuente secundaria esté conectada a un generador de emergencia. Esta configuración es ampliamente utilizada en complejos habitacionales, edificios, centros comerciales, hospitales y otras infraestructuras críticas, debido a su capacidad de respuesta inmediata ante fallas del suministro.

Sin embargo, cuando se integran sistemas de generación distribuida, como los fotovoltaicos, a la red interna de una instalación, deben tomarse en cuenta nuevas variables técnicas. En sistemas convencionales en baja tensión, la inyección fotovoltaica se encuentra aguas arriba de la transferencia de emergencia. Esto se hace para evitar que la fuente de emergencia y la solar entren en desfase, lo cual podría generar diferencias de potencial peligrosas entre ambas fuentes. Este principio de diseño busca proteger tanto los equipos eléctricos como la integridad del sistema de transferencia. No obstante, en el caso específico del centro comercial, la inyección solar estaba conectada directamente al mismo nodo de media tensión que la transferencia automática, lo cual representaba una condición de riesgo técnico que no había sido considerada en la instalación original.

Durante una maniobra de emergencia, se produjo una explosión en una parte del tren de celdas de media tensión. Según los análisis preliminares y las condiciones del sistema, se intuye que lo sucedido fue que la fuente de emergencia y la inyección solar entraron en desfase. Este desfase pudo haber sido lo suficientemente significativo como para sobrepasar

el aislamiento máximo de 24 kV que soportaban las celdas instaladas, provocando una falla dieléctrica interna. Esta situación evidenció una falla crítica en el diseño del sistema de transferencia, ya que no se habían implementado mecanismos de control o desconexión de la inyección solar durante eventos de emergencia. El incidente dejó en claro la necesidad de replantear el diseño de la transferencia automática considerando la coexistencia de múltiples fuentes de energía, incluyendo las renovables.

Frente a esta situación, el centro comercial solicitó una solución que permitiera solventar el problema de forma eficiente, tanto en términos de tiempo como de costos. El objetivo principal era asegurar que una falla de este tipo no volviera a repetirse, integrando una lógica de control que evitara el desfase entre fuentes y garantizara la seguridad del sistema. La solución debía contemplar no solo la reparación del daño físico en el tren de celdas, sino también la implementación de un sistema automatizado que permitiera el control coordinado de la transferencia y la inyección fotovoltaica. Con ello, se buscaba no solo restaurar la funcionalidad del sistema, sino también optimizar su desempeño y aumentar su confiabilidad a largo plazo.

#### **4.1. Objetivo general**

Controlar una transferencia automática de celdas en media tensión usando un PLC, para asegurar la continuidad del servicio eléctrico en caso de alguna eventualidad con GESUR.

#### **4.2. Objetivos específicos**

1. Desarrollar la disposición física del gabinete con el PLC.
2. Desarrollar el diagrama de flujo del sistema.
3. Programar el control de las celdas 1 y 2.
4. Programar una HMI para visualizar el estatus de las alarmas.
5. Programar los temporizadores del generador.
6. Integrar el control de la celda fotovoltaica.

## CAPÍTULO 5

---

### Alcance

---

La falla sufrida por el centro comercial dañó cinco de las nueve celdas de media tensión con las que contaba, junto con el gabinete de control que albergaba el PLC y la HMI para el control de la transferencia automática. Debido a esto, se solicitó el suministro de las cinco celdas dañadas, la reprogramación de la transferencia automática y la inclusión del control de la inyección solar.

El alcance de este proyecto comienza con el diseño de un nuevo gabinete de control. Este gabinete contendrá el PLC y la HMI para el control de la transferencia. Cabe destacar que este diseño fue únicamente en cuanto a la disposición física, ya que los planos eléctricos fueron realizados por el departamento de diseño de ESINSA. No se pudo hacer una selección de equipos, ya que el centro comercial solicitó que todos los equipos fueran exactamente los mismos que se tenían antes de la falla.

Otro de los alcances fue desarrollar el control de la transferencia, considerando las maniobras de los interruptores motorizados, el control del generador y el control de la inyección solar; programar la lógica de funcionamiento, el arranque y las ejercitaciones del generador de emergencia; la conexión y desconexión de la inyección fotovoltaica, y la programación de las pantallas del HMI.

La instalación mecánica y eléctrica de los equipos no está contemplada en este trabajo, así como tampoco la puesta en marcha del tren de celdas completo. Solo se incluye la puesta en marcha de las dos celdas motorizadas y la celda de inyección solar. La puesta en marcha del tren de celdas completo fue realizada por un ingeniero certificado de Schneider Electric, con el fin de hacer válida la garantía de los trabajos y los equipos. La instalación mecánica y eléctrica de todos los equipos fue responsabilidad de un equipo de técnicos electricistas subcontratados para este proyecto.

### **6.1. Niveles de tensión y el empleo práctico de la media tensión**

La norma ANSI C84.1-1980 establece los parámetros esenciales para los rangos de tensión en sistemas eléctricos, desde su generación hasta el consumo. Los rangos de tensión se clasifican meticulosamente, como se ilustra en la tabla de la tabla 1. Este estándar es fundamental para asegurar el transporte eficiente de la energía eléctrica y su distribución en redes nacionales, hasta su utilización final en aplicaciones domésticas como la iluminación y los electrodomésticos. Cada rango de tensión está definido con el objetivo de maximizar la eficiencia y la seguridad en cada etapa del suministro eléctrico.

Además, la norma proporciona una guía clara para la selección de equipos adecuados y la gestión de infraestructuras eléctricas, permitiendo a ingenieros y técnicos diseñar sistemas que cumplan con los requisitos de estabilidad y seguridad. La correcta aplicación de estos rangos de tensión no solo optimiza la operación y el mantenimiento de las redes eléctricas, sino que también contribuye a prevenir problemas técnicos que podrían surgir por el mal manejo de las especificaciones eléctricas [1].

**Cuadro 1.** Voltajes estándar nominales de sistemas trifásicos según ANSI C84.1-1989

Clase de Voltaje	Tres hilos	Cuatro hilos
Baja Tensión	240	208 Y/120
	480	240/120
	600	480 Y/277
Media Tensión	2,400	4,160 Y/2400
	4,160	
	4,800	
	6,900	
	13,800	8,320 Y/4800
		12,000 Y/6,930
		12,470 Y/7,200
		13,200 Y/7,620
		13,800 Y/7,970
		20,780 Y/12,000
		22,860 Y/13,200
Alta Tensión	23,000	
	34,500	24,940 Y/14,400
	46,000	34,500 Y/19,920
	69,000	
Muy Alta Tensión	115,000	
	138,000	
	161,000	
	230,000	
Ultra Alta Tensión	345,000	
	500,000	
	765,000	
Ultra Alta Tensión	1,100,000	

*Elaboración propia*

Para entender los beneficios de utilizar diferentes tensiones en el transporte de la energía eléctrica veamos cómo se describe la caída de voltaje en un conductor en la ecuación 1.

$$\Delta V = \frac{\rho L P}{S V} \quad (1)$$

En donde:

$\rho$  es la resistividad del conductor.

L es la longitud del conductor en metros.

P es la potencia activa de la carga en vatios.

V es el voltaje nominal.

S es la sección transversal del conductor en mm<sup>2</sup>.

Si despejamos la sección transversal de la ecuación 1 obtenemos la ecuación 2:

$$S = \frac{\rho L P}{\Delta V V} \quad (2)$$

En las ecuaciones 1 y 2 podemos observar que un aumento en el voltaje nominal disminuye directamente tanto la caída de voltaje como la sección transversal del conductor. Esto es especialmente útil cuando se necesita transportar la energía eléctrica a través de grandes extensiones de terreno, como ocurre en muchos centros comerciales [2].

La principal ventaja de transportar la energía eléctrica en alta tensión es un ahorro significativo en el costo del cableado eléctrico. Ya sea de aluminio o cobre, un calibre menor en un conductor puede suponer un ahorro considerable cuando se deben alimentar grandes extensiones de terreno. Una desventaja de este sistema de transporte es la necesidad de colocar subestaciones de media tensión en lugares estratégicos del terreno, ya que las máquinas, sistemas de iluminación y otros sistemas de uso cotidiano funcionan en baja tensión. Por lo tanto, en estas subestaciones, es necesario instalar celdas de media tensión y transformadores para convertir la media tensión en baja tensión.

En la siguiente subsección explicaremos qué son las celdas de media tensión, qué tipos de celdas existen y profundizaremos en las celdas de media tensión utilizadas en este proyecto.

## 6.2. Celdas de media tensión

Las celdas de media tensión son dispositivos utilizados para la conmutación, protección y control de circuitos eléctricos en sistemas de distribución de energía que operan en el rango de media tensión. Estas celdas están diseñadas para asegurar la seguridad y fiabilidad en la distribución eléctrica, permitiendo la interrupción y reconexión de circuitos sin riesgos para el personal o los equipos. Funcionan mediante el aislamiento y la interrupción del arco eléctrico que se produce al abrir y cerrar un circuito, garantizando que la energía se distribuya de manera controlada y segura .

Existen diferentes tipos de celdas de media tensión, siendo las más comunes las celdas al vacío y las celdas con SF<sub>6</sub> (hexafluoruro de azufre). Las celdas al vacío utilizan un interruptor en el que los contactos se abren en un ambiente de vacío, lo que permite la interrupción del arco eléctrico sin que haya ionización del medio circundante . Por otro lado, las celdas con SF<sub>6</sub> utilizan este gas como medio de aislamiento y extinción del arco. El SF<sub>6</sub> es un gas dieléctrico que posee excelentes propiedades de aislamiento, lo que lo hace ideal para aplicaciones de alta y media tensión [3].

El SF6 (hexafluoruro de azufre) es un gas inerte, no tóxico y no inflamable, conocido por su alta capacidad de aislamiento y extinción del arco eléctrico. El SF6 tiene una densidad de 6.13 g/L, lo que lo hace cinco veces más denso que el aire. la geometría molecular del SF6 es octaédrica y está formado de seis átomos de flúor enlazados a un núcleo de azufre.[3] Es un gas de efecto invernadero 20,000 veces más perjudicial que el CO2. [3].

En una celda de media tensión, el SF6 se utiliza para rodear los contactos del interruptor, evitando la ionización del aire y permitiendo que el arco eléctrico se extinga rápidamente al abrirse los contactos. Esto no solo mejora la seguridad operativa, sino que también prolonga la vida útil de los equipos.

### 6.2.1. Celdas SM6

De acuerdo con [4], las celdas SM6 de Schneider Electric son un ejemplo destacado de celdas que utilizan SF6. Estas celdas son compactas, modulares y están diseñadas para aplicaciones de distribución secundaria. Ofrecen alta fiabilidad y seguridad, facilitando la instalación y el mantenimiento gracias a su diseño compacto y modular.

**Figura 1.** Tren de celdas SM6, de la marca Schneider Electric [4].

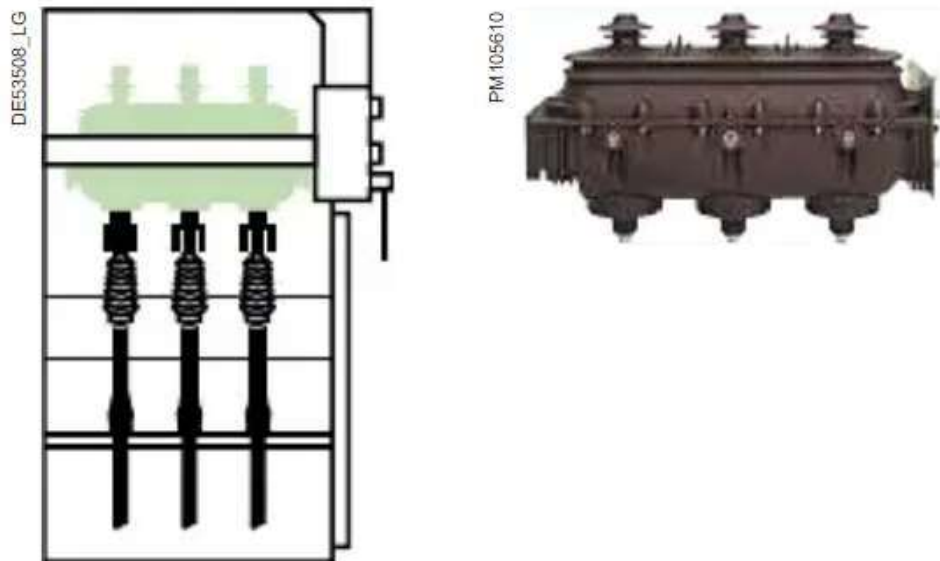


Como se ve en la fig. 2, el elemento interruptor (parte de color café) es la única parte de la celda que está aislada en SF6. En este elemento es donde se realiza la maniobra de conexión y desconexión. Una de las principales ventajas de aislar únicamente el elemento interruptor es que las celdas pueden ser considerablemente pequeñas, en comparación de las subestaciones que tienen aislados todos sus elementos.

Dentro la gama de celdas SM6 se encuentran distintos tipos de celda según la funcionalidad de la celda [4]. Entre las opciones más utilizadas se encuentran:

- Celdas IM: unidad de conmutación. Es el tipo de celda más sencillo. Consiste en el elemento desconectador aislado en SF6 con conexión a barras de cobre. Es típicamente utilizada como celda de entrada en subestaciones de media tensión.
- Celdas QM: Unidad de conmutación fusible de protección. Este tipo de celda es generalmente utilizado como celda de salida. Combina el elemento interruptor y un fusible de protección.
- Celda DM1: Unidad de conmutación con interruptor termomagnético motorizado. Este tipo de celda es especialmente útil cuando se necesitan realizar maniobras de forma remota o automática. Integra un interruptor termomagnético en línea con el interruptor aislado. Además, estas celdas incorporan relés de protección, transformadores de corriente y transformadores de potencial. Estos elementos son esenciales en los sistemas de control para llevar a cabo maniobras remotas y/o automáticas.

**Figura 2.** Elemento interruptor en celdas SM6 de Schneider Electric [4].



## 6.3. Transferencias automáticas

**Figura 3.** Transferencias automáticas serie 300, marca ASCO Power Technologies [5].



Las transferencias son arreglos de interruptores mecánicos que tienen la capacidad de conmutar entre dos fuentes diferentes hacia una misma carga. Entre las transferencias mecánicas existen dos tipos: manuales y automáticas. Son estas últimas de las que hablaremos [6].

Existen diferentes arreglos o configuraciones que se le pueden asignar a las transferencias automáticas. La configuración más común es la transferencia automática de emergencia. En esta configuración, la transferencia conmuta entre una fuente de energía principal y una de emergencia, siendo la fuente de energía principal la proveniente del proveedor de electricidad, mientras que la fuente de emergencia puede provenir de un UPS o un generador de emergencia. [7]

Las transferencias automáticas, o ATS por sus siglas en inglés, son interruptores que tienen la capacidad de detectar la presencia de voltaje tanto en la fuente principal como en la fuente secundaria o de emergencia. Esta información es enviada a una unidad de control, que se encarga de realizar las maniobras de conmutación [8]. Estos controladores necesitan ser parametrizados, ya que los parámetros son fundamentales para que el funcionamiento de la transferencia se ajuste a las necesidades del usuario. Entre estos parámetros se encuentran:

- Voltaje nominal de la red.

- Voltaje nominal de la fuente de emergencia.
- Frecuencia de la red.
- Frecuencia de la fuente de emergencia.
- Tiempo de retardo de conmutación.
- Tiempo de restablecimiento.
- Límite de sobrevoltaje y subvoltaje.

Una transferencia automática configurada como sistema de emergencia monitorea constantemente la fuente de energía principal. Cuando ocurre un corte de energía o la calidad de la señal eléctrica se degrada, el controlador de la transferencia automática envía un comando de arranque al generador de emergencia [8], en caso de que la fuente secundaria sea un generador. Una vez que el generador ha arrancado, el controlador monitorea el voltaje y, si se cumplen las condiciones de tensión establecidas, la carga se conmuta hacia la fuente de energía secundaria.

La maniobra de reconexión a la fuente de energía principal funciona de la misma manera. El controlador de la transferencia monitorea el voltaje de la fuente principal. Cuando la tensión regresa y se cumplen los parámetros establecidos, la transferencia vuelve a conmutar hacia la fuente de energía principal.

Cuando hablamos de esta configuración, tenemos que saber que, dependiendo de la aplicación que se la va a dar a la transferencia, existen dos tipos de transiciones para la reconexión: transición abierta y cerrada [9]. Entiendase transición como el tiempo que transcurre desde que se desconecta una de las fuentes de energía y se conecta la otra. Es importante recalcar que cuando hablamos de transiciones abiertas o cerradas, hacemos referencia a la maniobra de reconexión a la fuente principal, una vez la energía de esta se haya reestablecido. No podemos hablar de transiciones cerradas en la maniobra de conexión a la fuente de energía secundaria, ya que no hay forma de predecir una falla en la fuente principal.

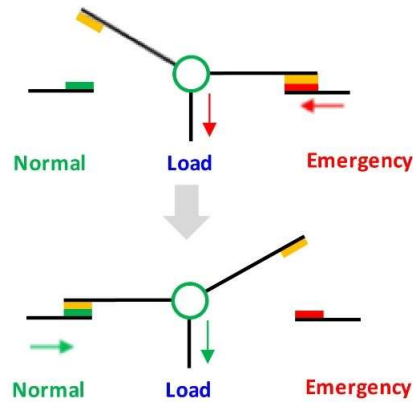
### **6.3.1. Operaciones de transición abierta**

Como su nombre ya lo sugiere, una operación de transición abierta es en la que, por un periodo de tiempo, la carga se queda desconectada de ambas fuentes de energía. Esto se conoce como "paso por cero", haciendo referencia a que la carga se queda durante el tiempo que los interruptores mecánicos hacen la conexión. Este tiempo puede variar según el fabricante, pero por lo general está en el orden de las décimas de milisegundos.[9].

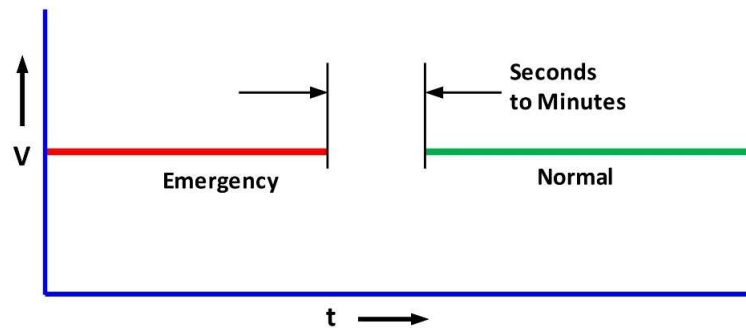
como se puede ver en la figura ??, cuando se va a hacer la maniobra de reconexión a la fuente principal, hay un pequeño espacio de tiempo en el que la carga se queda

desconectada. Este tipo de configuración es altamente utilizada para un rango muy amplio de aplicaciones, en especial cuando los equipos conectados en la carga no son susceptibles a pequeñas diferencias de ángulo en las fases de ambas fuentes[9].

**Figura 4.** Posición de los contactos durante una reconexión en transición abierta [9].



**Figura 5.** Salida de voltaje del interruptor de transferencia a las cargas durante la conmutación de transición abierta [9].

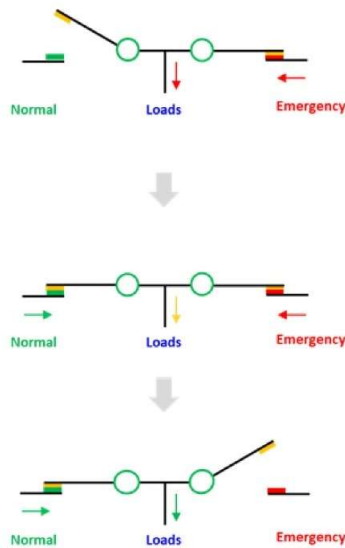


Dentro de las operaciones de transición abierta se encuentra un subtipo de operación llamado secuencia de conmutación retardada [9]. Como su nombre lo sugiere, en este tipo de operación existe un retardo intencionado. Este tipo de operaciones se utiliza cuando en la carga hay uno o varios motores eléctricos[10]. Cuando ocurre una reconexión a la fuente principal de energía, sin contemplar un retardo, existe una alta probabilidad que exista un desfase significativo entre la señal que estaba alimentando el motor y la fuente principal. Esto puede resultar en corrientes de transitorias de excitación anormales que pueden disparar las protecciones termomagnéticas de la instalación[10]. Este retardo en la reconexión está pensado para esperar a que todos los motores se detengan y encender el sistema desde el reposo. De esta forma se mitigan los efectos negativos mencionados antes.

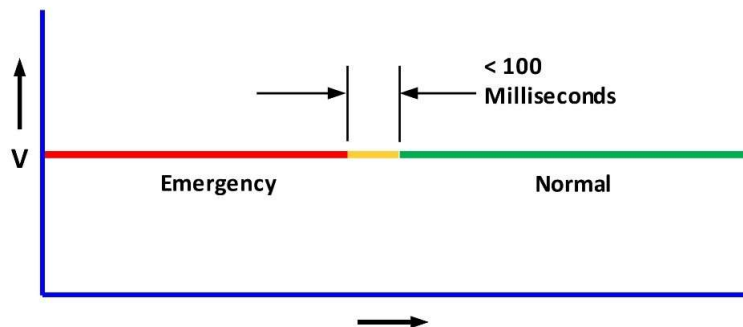
### 6.3.2. Operaciones de transición cerrada

A diferencia de las operaciones de transición abiertas, en una transición cerrada no existe un paso por cero. En otras palabras, la carga deja de estar alimentado en ningún momento de la maniobra. Estas transferencias son útiles en aplicaciones en donde la carga es sensible a diferencias de ángulos de fase. Durante este tipo de maniobra, el controlador de la transferencia automática debe hacer una sincronización entre las fases de ambas fuentes de energía y, por un breve periodo de tiempo, ambas fuentes están conectadas a la carga como se puede ver en la figuras 6 y ???. El tiempo en el que la carga se encuentra conectada a ambas fuentes de energía, puede variar de fabricante a fabricante, pero por lo general está en el orden de las decenas de milisegundos [9].

**Figura 6.** Posición de los contactos durante una reconexión en transición cerrada [9].



**Figura 7.** Salida de voltaje del interruptor de transferencia a las cargas durante la conmutación de transición cerrada [9].



## 6.4. Generadores de emergencia

Los generadores de emergencia están compuestos por dos componentes principales: motores de combustión y generadores eléctricos. El motor de combustión es el encargado de generar el trabajo mecánico necesario para hacer girar el generador [11].

El generador eléctrico, por su parte, es el responsable de producir electricidad. Este recibe el torque generado por el motor de combustión, transformando esa energía mecánica en energía eléctrica. Para entenderlo de manera práctica, comparemos su funcionamiento con el de un motor eléctrico. Existen muchos tipos y configuraciones de motores eléctricos, pero todos operan bajo el mismo principio: cuando se induce una corriente en un motor eléctrico, este comienza a girar. Es decir, los motores eléctricos convierten energía eléctrica en energía cinética rotacional.

Los generadores funcionan de manera similar a los motores eléctricos, pero con los roles invertidos. En lugar de convertir electricidad en movimiento, los generadores toman la energía cinética rotacional proporcionada por el motor de combustión y la convierten en energía eléctrica.

De esta forma, los también llamados motogeneradores, son capaces de generar electricidad a través de la energía mecánica generada por un motor a combustión. Por lo general, los generadores que son de gran capacidad, suelen tener motores Diesel. Esta elección se debe a que este tipo de motor es capaz de generar un gran torque, a comparación de los motores a gasolina.

## 6.5. Páneles fotovoltaicos

El efecto fotovoltaico fue descubierto por el físico experimental francés Edmund Becquerel, en el año 1839, cuando expuso a la luz una pila electrolítica de dos electrodos que estaba sumergida en una sustancia electrolítica. Los científicos W. Smith, W. Adas y R. Day descubren la fotoconductividad del selenio a finales del siglo XIX y construyen la primer celda sobre una oblea de selenio. En años posteriores, en el año 1941 se construye la primer celda solar gracias al trabajo de Albert Einstein sobre el efecto foto-eléctrico. Esta primer celda solar tenía una eficiencia del 1 %. La primer compañía que comercializó estas celdas solares fue Western Electric a mediados de la década de 1950. La tecnología fue perfeccionada a través de los años y utilizada en aplicaciones espaciales. Hoy la tecnología tiene una alta eficiencia y es usada al rededor de todo el mundo gracias a su bajo coste por Watt/Hora [12].

Una celda solar es un dispositivo que, en pocas palabras, es capaz de convertir la energía irradiada por el sol en energía eléctrica, sin necesidad de mecanismos móviles. Las celdas solares están construidas de semiconductores, cuya capacidad de conducir la electricidad puede ser modificada según sea la aplicación. [12]

**Figura 8.** Sección de granja solar ubicada en planta de agroproductos en Palín, Escuintla, Guatemala



Según [12], la estructura molecular de las celdas solares pueden dividirse en tres grupos distintos:

- Cristal simple, que se caracteriza por una estructura ordenada y periódica de átomos que forman patrones geométricos tridimensionales. Los cristales de silicio son un ejemplo de este tipo de estructuras.
- Policristalino: Estas estructuras están formadas por secciones cristalinas orientadas independientemente que, al unirse, forman una estructura no periódica y con discontinuidades.
- Amorfo: Es una estructura que no tiene regularidad alguna en su arreglo atómico. No es posible reconocer un patrón en una estructura amorfa.

En la actualidad, los tipos de paneles más comunes son los mono u policristalinos de silicio, fabricados con semiconductores III-V, fabricados con semiconductores II-V y de la familia del silicio amorfo. Este último tipo de panel es especialmente útil gracias a su integrabilidad modular [12].

Las granjas solares están formadas por grupos de celdas interconectadas entre sí de tal forma que, en su salida, se obtenga el voltaje de operación requerido y la potencia deseada.

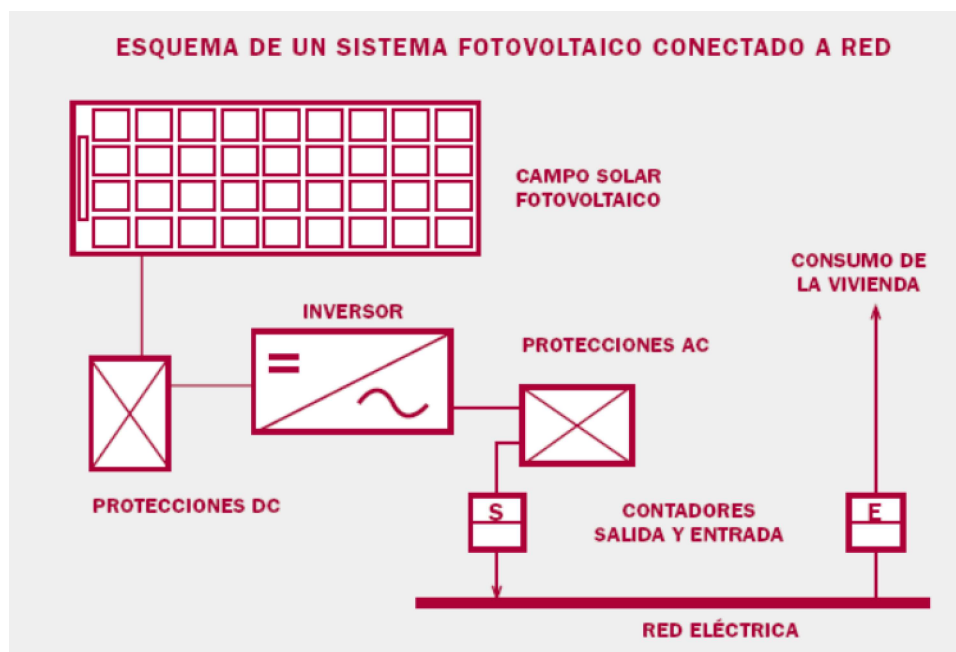
Cuando se habla de interconexión entre celdas es importante notar que hay dos formas de conectar celdas entre si: en serie y el paralelo [12]. Ya que las celdas solares son fuentes energía eléctrica en corriente directa, puede simplificarse su entendimiento a una batería. De esta forma se pueden conectar estas baterías de tal forma que obtengamos en la salida las características de corriente y voltaje deseado.

En una granja solar se compone por cinco subsistemas[12]:

- Subsistema fotovoltaico: compuesto por los arreglos serie-paralelo de módulos de celdas solares incluyendo protecciones eléctricas.
- Subsistema de almacenamiento: compuesto por arreglos serie-parelelo de baterías en las que se almacena la energía residual. Este subsistema no es utilizado en todas las granjas solares ya que no siempre interesa almancenar la energía, además que eleva el costo inicial y de mantenimiento.
- subsistema de regulación de carga: consta de sistemas electrónicos que controlan la carga de las baterías de acomulación de energía.
- Subsistema de conversión: integra sistemas de electrónicos llamados inversores que convierten la energía electricas de corriente directa a corriente alterna, además de elevar el voltaje para emparejarlo a la red electrica a la que se le va a inyectar la energía.
- Subsistema de monitorización y registro: este subsistema es el que se encarga de registrar la generación y consumo de energía de la granja solar.

Estos tres últimos subsistemas, en la actualidad, se integran en un solo equipo, llamado comercialmente de forma incorrecta como inversor, ya que los inversores forman parte del subsistema de conversión. un sistema fotovoltaico moderno suele verse como el diagrama de la figura 9

**Figura 9.** Esquema de un sistema fotovoltaico conectado a la red [13].



## 6.6. Lenguaje de programación Ladder

Ladder es uno de los cinco lenguajes estándar especificados por la norma IEC 61131-3 para programar PLC. Fue diseñado para ser una representación gráfica de la lógica de relés que se utiliza en sistemas de control industriales. Esta forma de visualizar el código hace que su programación sea fácil de adoptar por ingenieros sin conocimientos avanzados de programación [14].

Ladder utiliza un formato de diagrama que se parece a una escalera. Cada "escalón" del diagrama representa una instrucción lógica o una operación de control que el PLC debe ejecutar. Según [14] Los componentes principales del diagrama incluyen:

- Contactos normalmente abiertos y cerrados: representan condiciones lógicas que deben cumplirse para activar una operación. Los contactos normalmente abiertos permiten el paso de la señal cuando la condición es verdadera, mientras que los contactos normalmente cerrados bloquean la señal cuando la condición es verdadera.
- Bobinas: actúan como salidas lógicas que se activan si la secuencia de contactos a las que están conectadas cumplen las condiciones lógicas del escalón. Pueden representar el estado de dispositivos como encendido y apagado o activado y desactivado.

- Otras instrucciones: ladder también permite el uso de temporizadores, contadores y funciones matemáticas para operaciones más complejas. Por ejemplo, las instrucciones de temporización pueden controlar la duración de una señal, mientras que las funciones matemáticas permiten realizar cálculos como sumas o divisiones para ajustar variables en el proceso. Todas estas instrucciones se agragan al código por medio de bloques.

En un diagrama típico, los contactos se conectan en serie o en paralelo para definir operaciones lógicas de tipo AND y OR, respectivamente. Por ejemplo, si se colocan dos contactos en serie, ambos deben estar activos para que la señal continúe y active la bobina correspondiente. Esta sería la topología básica de una compuerta AND. Por otro lado, si los contactos están en paralelo, basta con que uno esté activo para que la bobina se active. Esto representa una compuerta OR [14].

La simplicidad del lenguaje Ladder lo convierte en una herramienta fácil de utilizar en la industria. Al observar el diagrama de escalera en tiempo real, los programadores pueden ver en tiempo real el estado de cada contacto y bobina, lo que les permite identificar rápidamente cualquier falla en el proceso o en el equipo controlado por el PLC. Esto lo hace especialmente útil en ambientes industriales, donde detener una línea de producción es altamente perjudicial [14].

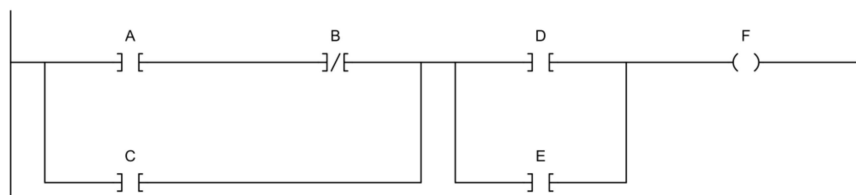
Ladder, además de ser un lenguaje de programación versátil, es muy útil para programar secuencias en donde el funcionamiento es puramente lógico [14].

**Figura 10.** Ejemplo básico de programación en ladder [14].

```

if (((A and not B) or C) and (D or E)) then
  F = 1
else
  F = 0
end if

```



## 6.7. PLC Modicon TM221CE40T

Es un PLC diseñado para el control de máquinas que incorpora capacidades de comunicación. Este se alimenta con 24V DC. Cuenta con 24 entradas discretas. El valor de voltaje para asegurar un 1 lógico es  $\geq 15V$  DC y para garantizar un 0 lógico es de  $\leq 15V$ .

En salidas discretas cuenta con un total de 16. Estas son del tipo transistor con capacidad de conmutar en 24V DC. Además, cuenta con dos salidas para PWM y PLS con capacidad de frecuencia de hasta 100 KHz [15].

Respecto a capacidad de procesamiento, el TM221CE40T tiene un tiempo de ejecución por instrucción de  $0.2\mu$  segundos para operaciones booleanas. Es capaz de manejar hasta 256 KB de memoria para aplicaciones de usuarios y datos, además de 256 KB adicionales para variables internas [15].

El PLC TM221Ce40T cuenta con distintos tiempos de respuesta para cada tipo de salida y entrada. Los tiempos de respuesta se pueden desglosar de la siguiente forma:

- 35  $\mu$ s de apagado para las entradas I2 a I5.
- 5  $\mu$ s de encendido para las entradas I0, I1, I6, I7 catalogadas como entradas rápidas.
- 35  $\mu$ s de encendido para otras terminales de entrada.
- 5  $\mu$ s de apagado para las entradas I0, I1, I6, I7.
- 100  $\mu$ s de apagado para otras terminales de entrada.
- 5  $\mu$ s de encendido y apagado para salidas Q0, Q1.
- 50  $\mu$ s de encendido y apagado para salidas Q2, Q3.
- 300  $\mu$ s de encendido y apagado para otras terminales de salida.

En términos de comunicación, el TM221CE40T incluye un conector ethernet RJ45 con soporte para el protocolo de comunicación Modbus TCP [15].

**Figura 11.** PLC Modicon TM221CE40T de Schneider Electric [15].



### 6.7.1. Módulo de expansión TM3DM8R

El TM3DM8R es un módulo de expansión que proporciona 8 salidas discretas del tipo Relé. Las Salidas de este módulo son capaces de conmutar en voltajes de 24V DC y 240V AC. La corriente nominal de las salidas es de 2 A por canal y 8 A como máximo por módulo. El tiempo de respuesta de cada canal del módulo es de 10 ms tanto en apertura como en cierre de los contactos tipo relé. El módulo se conecta al PLC por medio de el conector TM3 Bus [16].

**Figura 12.** Módulo de expansión TM3DM8R de Schneider Electric [16].



### 6.7.2. Protocolo de comunicación Modbus

El protocolo Modbus es un estándar de comunicación muy utilizado en sistemas de automatización industrial para comunicar dispositivos. El protocolo fue desarrollado por Modicon en 1979 y permite la transmisión de datos entre dispositivos en redes seriales y TCP/IP [17].

Modbus opera en dos modos principales [17]:

- Modo maestro-esclavo: el maestro inicia la comunicación enviando comandos a los dispositivos esclavos y los esclavos responden con la información solicitada. Sólo

un esclavo puede responder a la vez. esto evita conflictos en la transmisión de datos. Este modo se utiliza comúnmente en redes seriales.

- Modo cliente-servidor: utilizado principalmente en redes TCP/IP, en donde el cliente envía solicitudes al servidor para obtener información o realizar acciones. Este enfoque permite conexiones más rápidas y eficientes entre dispositivos en redes más extensas.

La estructura de Modbus se basa en un formato de datos simple y estandarizado, lo que lo hace compatible con una variedad amplia de dispositivos industriales. La comunicación se realiza mediante registros. Estos registros contienen datos como estados de sensores, comandos de control y otros parámetros operativos [17].

### **6.7.3. Protocolo TCP/IP**

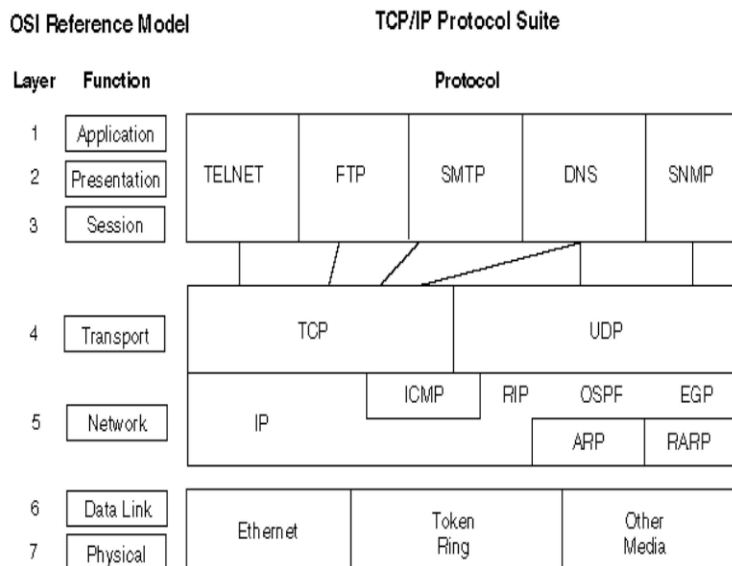
TCP/IP es un protocolo de comunicación basado en un conjunto de reglas que garantiza la transmisión de datos de manera confiable y efectiva entre múltiples redes. Fue desarrollado originalmente por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos para interconectar diferentes redes, lo que lo convierte en un protocolo robusto y adaptable, capaz de mantener la comunicación incluso en situaciones adversas como guerras. Actualmente Internet está montado sobre el protocolo de comunicación TCP/IP [18].

La estructura del protocolo TCP/IP está construido en capas. Según [18], estas capas son:

- Capa de aplicación: es la capa que define los servicios de Internet y las aplicaciones de red que puede utilizar un usuario. Incluye aplicaciones o procesos que usan protocolos de la capa de transporte para enviar datos a computadoras de destino. Algunos protocolos populares en esta capa son HTTP, FTP y SMTP.
- Capa de transporte: se encarga de asegurar el flujo de datos entre dos hosts, utilizando TCP para conexiones confiables y UDP para aquellas menos estrictas en cuanto a confiabilidad.
- Capa de red: se ocupa del enrutamiento de los datos a través de la red, utilizando el Protocolo de Internet (IP), que maneja las direcciones y la entrega de extremo a extremo.
- Capa de datos: esta capa gestiona los detalles de la comunicación con el medio físico de la red, como cables o tarjetas de red, usando protocolos como ARP y PPP.

El protocolo TCP/IP se caracteriza por su capacidad de detectar errores en la comunicación y su capacidad de recuperación automática. Esto le permite continuar operando incluso ante fallos de nodos o líneas de comunicación.

**Figura 13.** Diagrama del protocolo TCP/IP usando el modelo OSI como referencia [18].



#### 6.7.4. Conmutador ethernet TCSESU053FN0

El TCSESU053FN0 es un switch ethernet con 5 puertos de salida. El tipo de puerto es 10/100BASE-TX.. Su tensión de alimentación es de 24V DC y está diseñado para montaje en riel DIN [19].

**Figura 14.** Conmutador Ethernet de Schneider Electric [19].



## 6.8. Terminal HMISTU655

La HMISTU655 es una interfaz hombre-máquina de Schneider electric con una pantalla táctil de 5.7 pulgadas. La pantalla tiene una resolución de 320 x 240 píxeles (QVGA) y cuenta con tecnología LCD TFT, lo que le da una buena calidad de imagen en distintas circunstancias de iluminación. Esta HMI incluye un puerto Ethernet para conexión por medio del protocolo TCO/IP. Dispone de 16 MB de memoria Flash y 64 KB de memoria RAM. Ofrece un puerto USB para carga y descarga de proyectos. La pantalla tiene certificación IP65, por lo que puede ser sometida a ambientes con polvo y a chorros de agua [20].

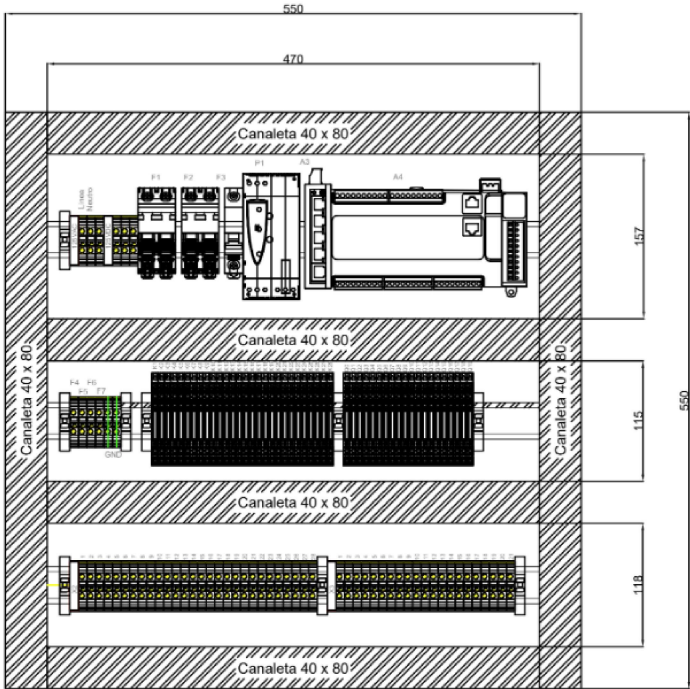
Las pantallas se programan en el software Vijeo Designer de Schneider Eléctric, incluida en la suite de software para programación de PLC. La HMI es capaz de comunicarse con equipos que integren el protocolo de comunicación Modbus montado en TCP/IP. Es capaz de leer espacios de memoria de PLCs para desplegar valores o estados de variables en su pantalla. El Software incluye elementos gráficos programables para el diseño de pantallas de usuario [20].

**Figura 15.** Pantalla HMISTU655 de Schneider Electric [20].



7.1. Disposición física del gabinete de control

Figura 16. Disposición física del gabinete de control



Dado a que el gabinete de control sufrió daños por la falla del tren de celdas, fue necesario diseñar un nuevo gabinete de control con elementos nuevos. Para este nuevo gabinete de control se utilizó un PLC modelo TM221 de la marca Schneider Electric. El PLC se alimentó de una fuente de voltaje a 24V que, a su vez, se alimenta de las líneas de 120V existentes. Se colocaron interruptores termomagnéticos de dos polos y 2 A en la alimentación de 120V para protección de la fuente de voltaje. Como se puede ver en la figura 16, el gabinete se compuso de 3 niveles. En el nivel superior se encuentra la alimentación, la fuente de voltaje en 24V y el PLC TM221. En el nivel intermedio se encuentran los relés de control de 24V y 2A controlados por las salidas digitales del PLC. Por último, el nivel inferior contiene las borneras de conexión para las entradas digitales para el PLC. Estas borneras son independiente y tienen accesorios portafusibles para protección de las entradas discretas del PLC. Se colocaron fusibles de 0.5 A. Para mantener un orden en el cableado del gabinete, se colocaron canaletas para conexión de todas las conexiones necesarias.

## 7.2. Diagrama de flujo del sistema

### 7.2.1. Principios de operación

Antes de diseñar el diagrama de flujo de operaciones fué indispensable entender el principio de funcionamiento del sistema. Con la información proporcionada por el centro comercial y con base al diagrama unifilar, se pudieron describir las condiciones de operación como se muestra en el cuadro 2.

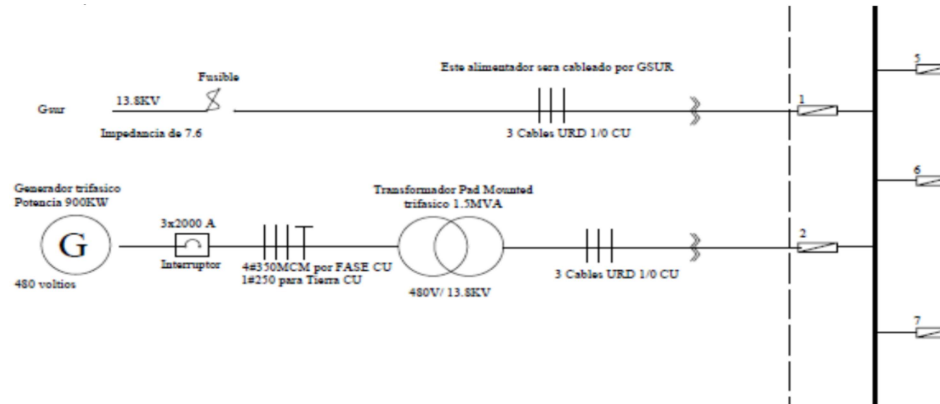
**Cuadro 2.** Tipos de operación segun las condiciones del relé GESUR.

Operación	Condiciones	Estados
Normal	Relé GESUR: Ok	Celda 1: Cerrada. Celda 2: Abierta. Salida fotovoltaica: Activado. Comando arranque generador: Off.
Emergencia	Relé GESUR: Bad.	Celda 1: Abierta. Celda 2: Cerrada. Salida fotovoltaica: Desactivada. Comando arranque generador: On.
Prueba generador	Relé GESUR: Ok	Celda 1: Cerrada. Celda 2: Abierta. Salida fotovoltaica: Activado. Comando arranque generador: On.

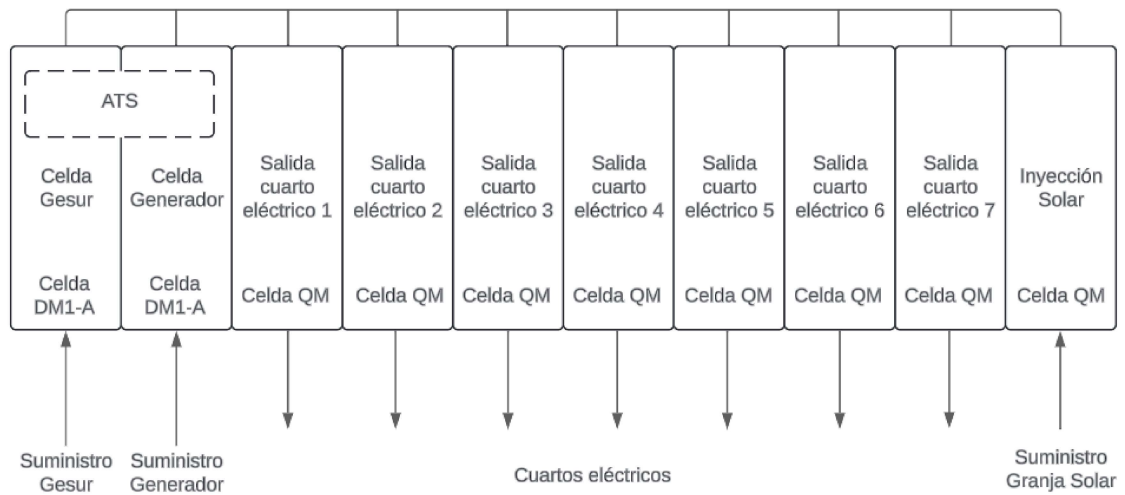
En una operación normal, la fuente principal de energía, GESUR en este caso, se encuentra suministrando la electricidad al centro comercial. La presencia de voltaje en

la celda de media tensión está siendo monitoreada por un relé de presencia de voltaje. La operación de emergencia, por otro lado, se inicia cuando no se detecta voltaje de la fuente principal de energía. En esta situación se enviará un comando de arranque al generador de emergencia. El voltaje en la fuente de emergencia, a diferencia de la fuente principal, no será monitoreada por un relé de presencia de voltaje. La salida fotovoltaica se conecta y desconecta por medio de contactores de tres polos y 40A conectados a la salida de los inversores del sistema fotovoltaico. Durante la operación de emergencia se estará monitoreando la presencia de voltaje en la fuente principal. Una vez se vuelva a detectar el regreso de la fuente principal, se va a hacer la reconexión y se va a reactivar la salida fotovoltaica. Una vez restablecida la conexión con la fuente principal se mandará el comando de apagado para el generador de emergencia.

**Figura 17.** Sección del diagrama unifilar de la instalación en media tensión.



**Figura 18.** Disposición de las celdas de media tensión



### 7.2.2. Tiempos para generador

Para garantizar el buen funcionamiento del generador fue necesario contemplar tiempos para las secuencias de arranque y parada. Normalmente, estos tiempos son compartidos por el fabricante. En este caso, la información del fabricante no estaba disponible, por lo que se utilizaron tiempos estándar. Estos se establecieron como se muestra en el cuadro 3

**Cuadro 3.** Tiempos para secuencias de generador.

<b>Nomenclatura</b>	<b>Descripción</b>	<b>Tiempo</b>
T1	Tiempo de espera para confirmar falla en línea GESUR	5 segundos
T2	Tiempo de espera para la estabilización del Generador	10 segundos
T3	Tiempo de espera para evitar el paro y arranque del Generador	10 minutos
T4	Tiempo de espera para confirmar Voltaje en línea GESUR	300 segundos
T5	Tiempo de espera para confirmar el paro completo del Generador	180 segundos
T6	Tiempo de espera para Pruebas del Generador	7 días
T7	Tiempo de espera de Prueba del Generador	10 minutos

Las secuencias del generador se describen, según la operación, de la siguiente forma:

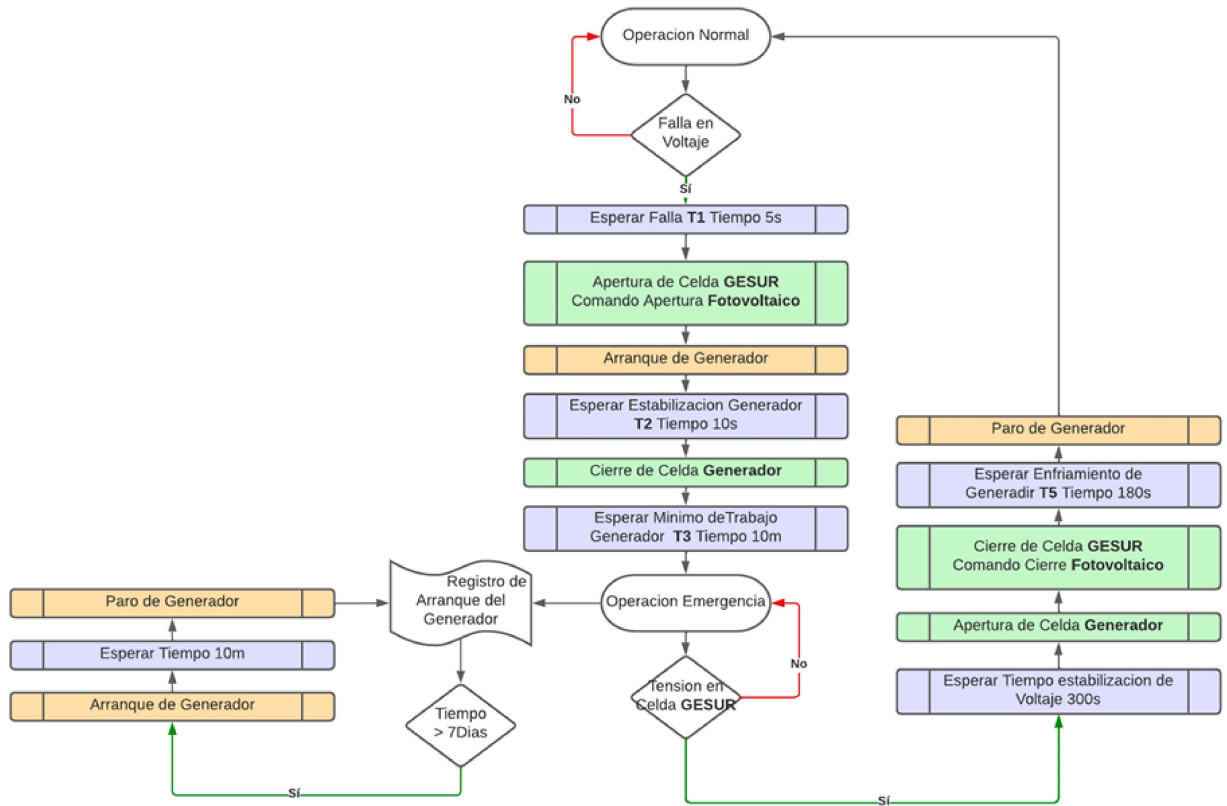
- En operación normal: se monitorea la presencia de voltaje en la celda de GESUR. Si hay presencia de voltaje, la operación continúa.
- Al existir una anomalía en el voltaje de GESUR, se espera un tiempo T1 para confirmar que no se trata de una falla temporal corta.
- Concluido el tiempo T1 se inicia con la siguiente secuencia
  - Se abre la celda de GESUR y se envía la señal para aislar la inyección fotovoltaica.
  - Se envía el comando de encendido y se espera un tiempo T2 para estabilizar la salida del generador.
  - Una vez transcurrido T2, se cierra la celda del generador y se espera un tiempo T3 para, en dado caso el voltaje en gesur se reestablezca intermitentemente, no se envíen señales de paro y encendido al generador. Durante T3 se ignora la presencia de voltaje en GESUR. En este punto se registra un arranque del generador que se tomará en cuenta como arranque exitoso en el ciclo de pruebas del generador.
- Una vez concluido T3, se empieza a monitorear el voltaje en la celda GESUR a la espera que se reestablezca.
- Cuando se detecte voltaje en GESUR se espera un tiempo T4 para la confirmación de la integridad de la tensión. Al concluir T4 se saca al generador de línea con la siguiente secuencia:
  - Se envía el comando de apertura a la celda del generador. Luego de esto, se cierra la celda de GESUR y se activa la inyección fotovoltaica.
  - Se espera un tiempo T5 para el paro completo del generador.

- Ejercitación para el generador: las maniobras de ejercitación para el generador se describen de la siguiente forma:

Durante una operación normal, cada vez que se cumpla un tiempo T6 se encenderá el generador durante un tiempo T7. Luego de concluido T7 el generador se parará y T6 se reiniciará.

Tomando los puntos anteriores en cuenta, se concluyó el diagrama de flujo de las operaciones como se muestra en la figura 19.

**Figura 19.** Diagrama de flujo de operaciones



### 7.3. Programación de celdas para transferencia

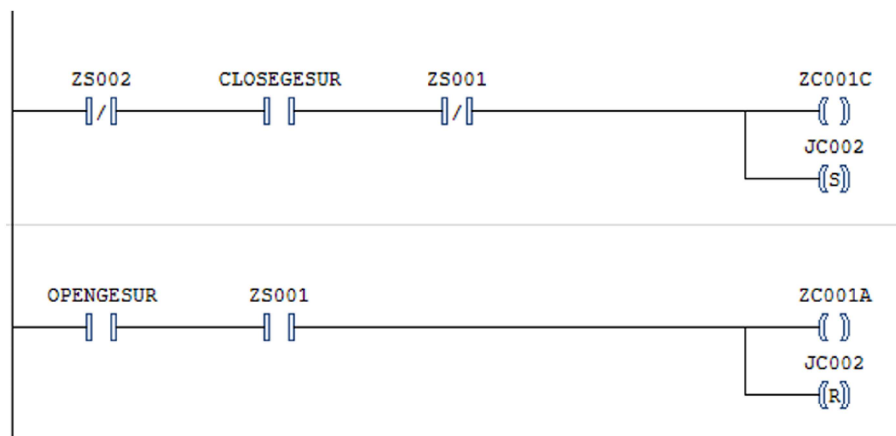
**Cuadro 4.** Señales para control de celdas y generador.

No.	Tipo	Descripción	ID
1	Entrada digital	Señal de relé de control GESUR	JS001
2	Entrada digital	Señal de estatus de celda GESUR	ZS001
3	Entrada digital	Señal de estatus de celda generador	ZS002
4	Salida digital	Comando de apertura celda GESUR	ZC001A
5	Salida digital	Comando de cierre celda GESUR	ZC001C
6	Salida digital	Comando de apertura celda generador	Q0-6
7	Salida digital	Comando de cierre celda generador	ZC002C
8	Salida digital	Control de contactor fotovoltaico	JC002
9	Salida digital	Control de arranque/paro generador	GENON

La programación fue realizada en el software SoMachine de Schneider Electric utilizando el lenguaje de programación Ladder. Para la codificación de las transferencias se tomaron en cuenta las entradas y salidas descritas en el cuadro 4. Estas se utilizaron para hacer el control, tanto de las celdas, como el generador y la inyección solar verificar los estados de las celdas y así entrar en las distintas operaciones. Todas las señales digitales fueron programadas como contactos momentáneos. Todas las salidas, menos las relacionadas con el control fotovoltaico, fueron bobinas momentaneas. para el control foto voltáico se usaron contactos de "set" y "reset".

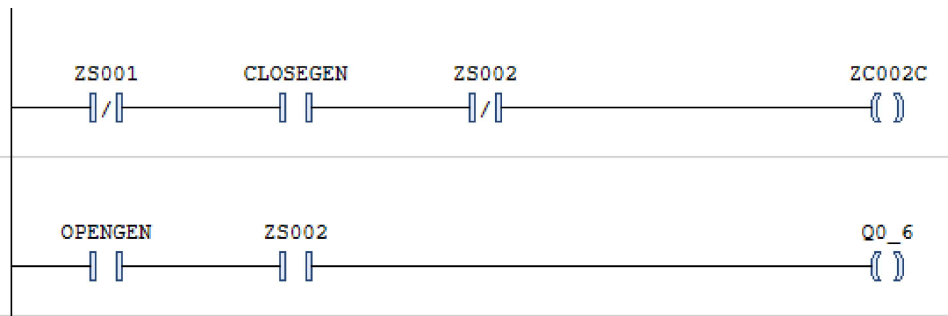
#### 7.3.1. Control de celdas

**Figura 20.** Programación de control de celda GESUR



En la figura 20 se ven las líneas de programación que controlan, tanto la apertura y cierre de la celda GESUR, como la activación y desactivación de la inyección fotovoltaica. En la primera línea, para hacer el cierre de la celda, el contacto auxiliar del interruptor de la celda del generador debe estar abierto (ZS002); esto fue importante para garantizar que ambas celdas no se encontraran cerradas al mismo tiempo. Se debe enviar el comando de cierre (CLOSEGESUR) y, a modo de redundancia, se debe cumplir que la celda esté abierta (ZS001). Si estas condiciones se cumplen, se envía el comando de cierre a la celda GESUR a través de ZC001C y se envía la señal de activación a los contactores de la inyección solar a través de JC002. Por lo contrario, para hacer la apertura de la celda, se debe enviar el comando de apertura (OPENGEN) y, de nuevo a modo de redundancia, se debe cumplir con que la celda esté abierta a través de ZS001. Cuando estas condiciones se cumplen, se envía el comando de apertura de la celda y se desactiva la inyección solar. Las señales de control de la inyección fotovoltaica están manejadas por las salidas digitales del módulo TM3DM8R. Estas salidas se conectan en las bobinas de los contactores que activan y desactivan la inyección.

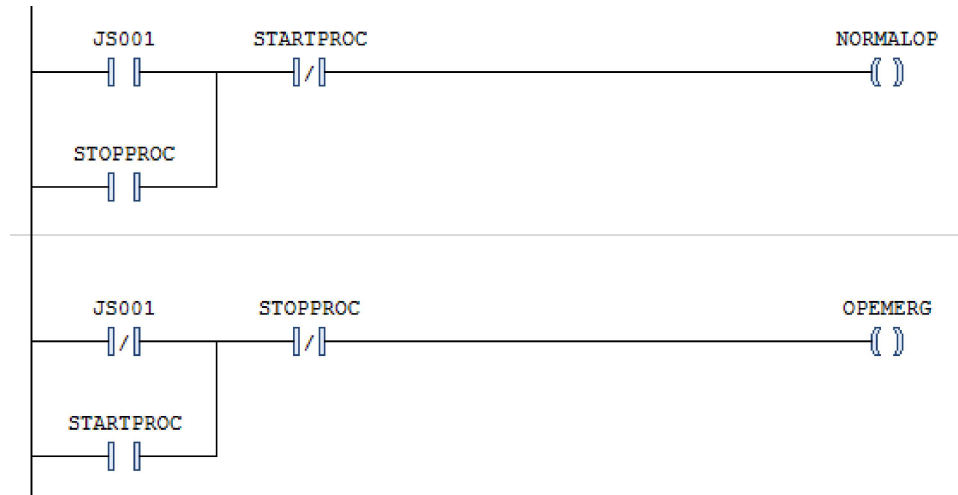
**Figura 21.** Programación de control de celda generador



El control de la celda del generador de emergencia es un reflejo del control de la celda GESUR. Para hacer el cierre de la celda, se debe cumplir con que el estatus de la celda GESUR debe estar abierto (ZS001) para evitar que ambas celdas estén cerradas, se debe enviar el comando de cierre (CLOSEGEN) y se debe cumplir que la celda esté previamente abierta. Cumplidas estas condiciones, se envía el comando de cierre a través de ZC002C. De la misma forma, para que se abra la celda del generador se debe enviar el comando de apertura y consultar si la celda estaba previamente cerrada. El comando de apertura se envía a través de Q0-6.

### 7.3.2. Programación de ATS

Figura 22. Programación de transferencia automática



La programación anterior controla solamente la apertura y cierre de las celdas. La combinación de estas dos programaciones aún no concluye en una transferencia automática. Falta hacer la programación para entrar en las operaciones de trabajo: normal y de emergencia. Para hacer este control se usó el contacto seco del relé de control de tensión en la celda GESUR. Para entrar en la operación normal se espera que exista presencia de voltaje en el relé de control de tensión en la celda GESUR y que no exista una bandera de arranque del generador activa. Estas banderas son STARTPROC y STOPPROC. STARTPROC se activa cuando se envía el comando de arranque del generador y se desactiva cuando se cumple el tiempo de seguridad (T3). La bandera STOPPROC se activa cuando se envía el comando de apertura de la celda del generador y se desactiva cuando se envía la señal de cierre de la celda GESUR. De esta forma, se garantiza que no se entre en ambas operaciones al mismo tiempo.

### 7.3.3. Programación de operación normal

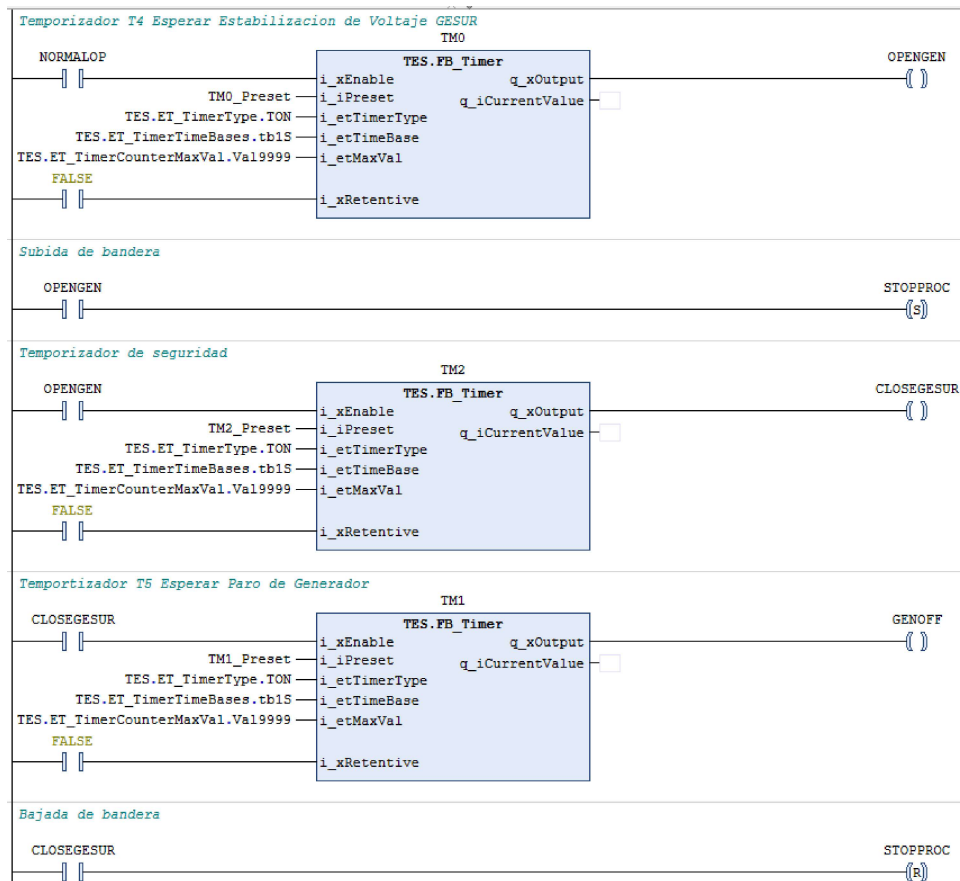
En operación normal, se programaron todos los procesos necesarios tanto para reconexión a GESUR, como los procesos para mantener esa fuente conectada. Como se ve en la figura 22, para ingresar a la operación normal, debía haber una presencia de voltaje en GESUR. En esta parte se encuentran programados los siguientes temporizadores:

- TM0: Se encarga de verificar la estabilidad de la señal en la línea GESUR (T4) una vez para enviar la señal de apertura a la celda del generador. A su vez, esta acción levanta la bandera para hacer la conmutación de la fuente de emergencia a la principal

y le da inicio al temporizador TM2. Si durante ese tiempo la tensión desaparece o no llega al voltaje requerido, el temporizador se reinicia.

- TM2: Este temporizador espera 3 segundos desde que se envía el comando de apertura de la celda del generador. Una vez concluido el tiempo, envía el comando de cierre de la celda GESUR para reconectarse a la fuente principal. Esta espera de 3 segundos es vital para evitar que ambas celdas, tanto GESUR como la del generador, estén cerradas al mismo tiempo. Este temporizador no es editable por el usuario.
- TM1: Espera un tiempo (T5) para dejar funcionando el generador sin carga. Esto reduce la temperatura gradualmente y protege los componentes del motor. Al mismo tiempo que el temporizador TM1 se activa, se baja la bandera para ingresar a la operación de emergencia y esperar una falla.

**Figura 23.** Programación de procesos de operación normal

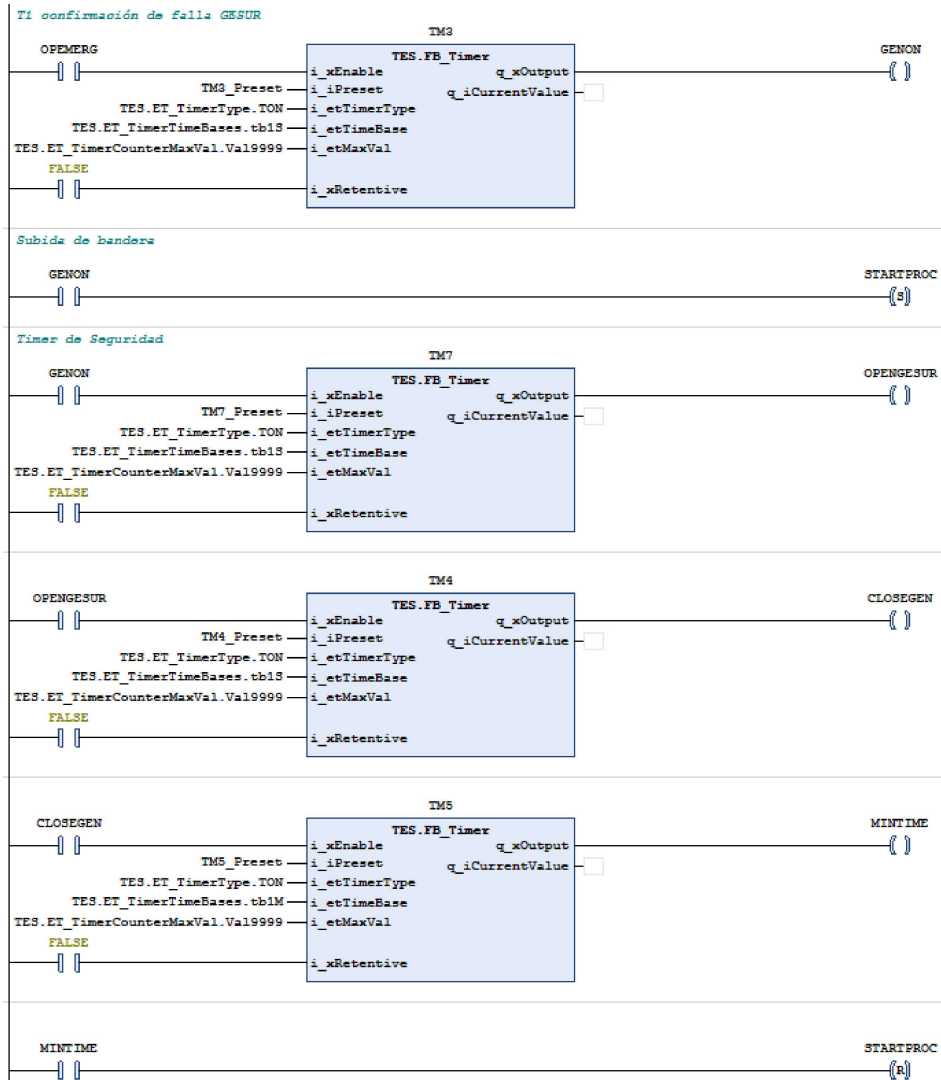


### 7.3.4. Operación de emergencia

En esta parte de la programación se encuentran todos los procesos necesarios para la conexión a la fuente de emergencia y el encendido del generador. Se programaron los siguientes temporizadores:

- TM3: Se inicia cuando se entra a la rutina de operación de emergencia. Espera 5 segundos para confirmar una falla en GESUR. Una vez concluido ese tiempo, se envía el comando de arranque del generador.
- TM7: Este temporizador cumple la misma función que TM2. Se activa cuando se envía la señal de encendido del generador, espera un tiempo y abre la celda de GESUR. Al final se determinó que este temporizador no era necesario, ya que una vez confirmada la falla en GESUR no existía necesidad de esperar un tiempo para abrir la celda. El tiempo para este temporizador se dejó en cero.
- TM4: Este temporizador es el encargado de esperar la estabilización del voltaje del generador. Cuando se cumple el tiempo T2, se envía la señal de cierre a la celda del generador. En este punto, el centro comercial se encuentra alimentado por la fuente de emergencia.
- TM5: Se encarga de asegurarse de que el generador esté encendido el tiempo mínimo sugerido para evitar desgaste innecesario en las piezas del motor. Una vez concluido el tiempo T3, se envía la señal para bajar la bandera de proceso, se espera el regreso de la tensión en la celda de GESUR y se puede ingresar nuevamente a la operación normal.

**Figura 24.** Programación de procesos de operación de emergencia



### 7.3.5. Ejercitación del generador y contador de eventos

Figura 25. Programación para ejercitación semanal del generador

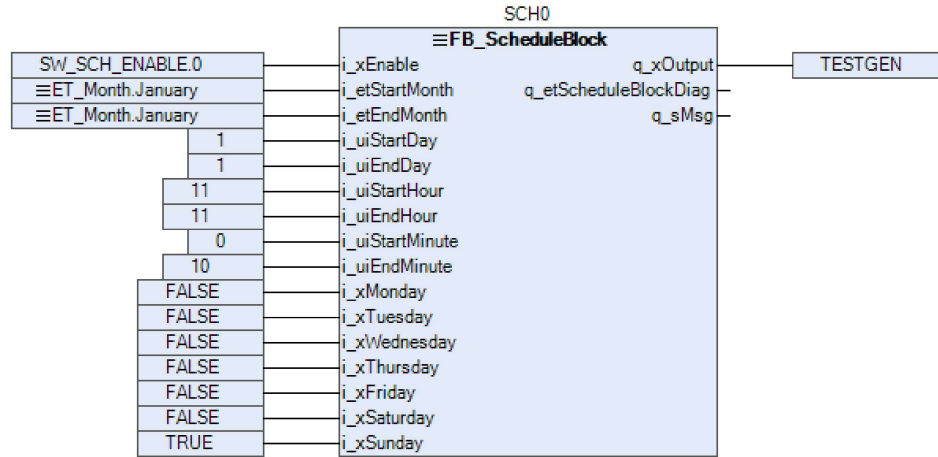
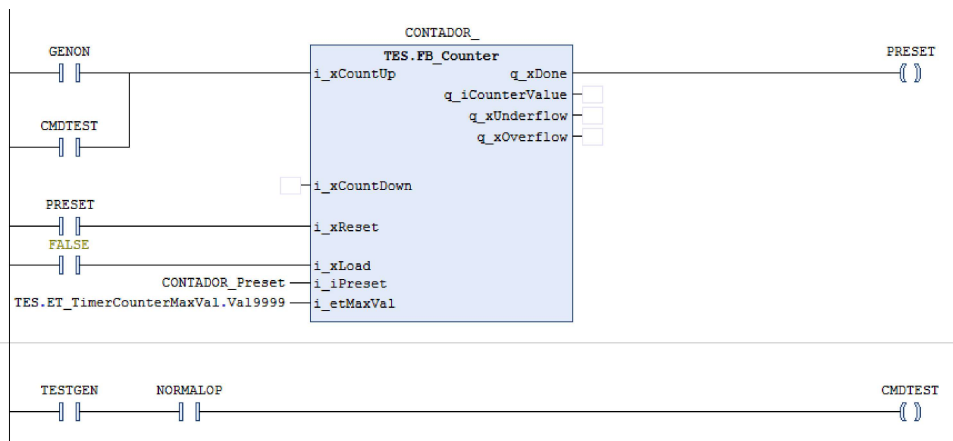


Figura 26. Contador de eventos y comando de encendido de prueba de genrador



Por recomendación de los fabricantes, fue necesario programar una ejercitación semanal para el generador. Se utilizó un bloque "Schedulebook" para programar un encendido de ejercitación todos los domingos a las 11:00 AM. Todos los domingos a esa hora, el bloque envía una señal de test al generador durante un tiempo T7. Durante este tiempo, el generador permanecerá arrancado. Una vez vencido T7, se termina la ejercitación del generador.

El centro comercial solicitó que se llevara un conteo de los arranques del generador. Para esto, se utilizó un bloque contador que suma un evento cada vez que se arranca el

generador. Como se puede ver en la figura 26, tanto el encendido de emergencia como el encendido de ejercitación del generador contribuyen al conteo de arranques. Se agregó una línea de código para evitar que, en caso que la secuencia de la ejercitación inicie durante una operación de emergencia, se añada una unidad al contador. El centro comercial terminó solicitando que ya no se hiciera el conteo de arranques del motor, por lo que este contador se reinicia constantemente.

### **7.3.6. Pantallas HMI**

La programación de la HMI contempló 3 pantallas: pantalla principal, pantalla de temporizadores y pantalla de entradas y salidas. La información de las pantallas se describe de la siguiente forma:

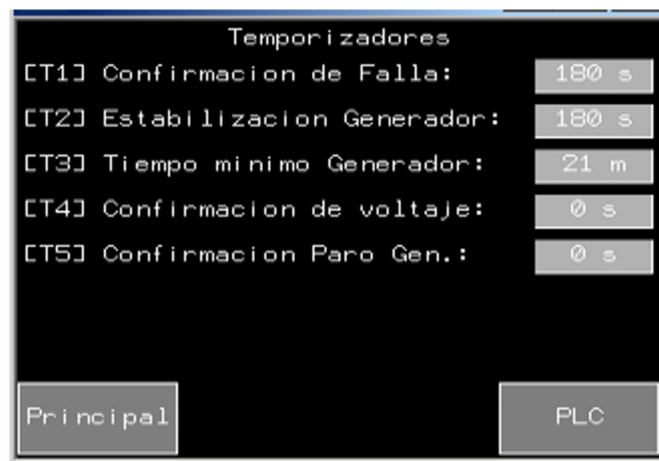
- Pantalla principal: Se muestran la información del estado de control, el proceso actual, el estado del sistema fotovoltaico, el estado de las celdas, la señal de voltaje de GESUR y el estado del generador, como se puede ver en la figura 27.
- Pantalla de temporizadores: En esta pantalla se pueden consultar los temporizadores T1, T2, T3, T4 y T5. Estos tiempos no pueden ser cambiados a petición del centro comercial.
- Pantalla de entradas y salidas: Aquí se pueden visualizar los estados de las entradas y salidas físicas del sistema.

El código de colores que se utilizó en este proyecto es: rojo indica estado cerrado y verde estado abierto. Por ende, si la celda GESUR es la que está alimentando el sistema, el indicador del estado de celda GESUR se encenderá en rojo y la celda del generador se encenderá en verde. Esta misma lógica se aplica para la pantalla de entradas y salidas

**Figura 27.** Pantalla principal HMI



**Figura 28.** Pantalla de temporizadores



**Figura 29.** Pantalla de entradas y salidas



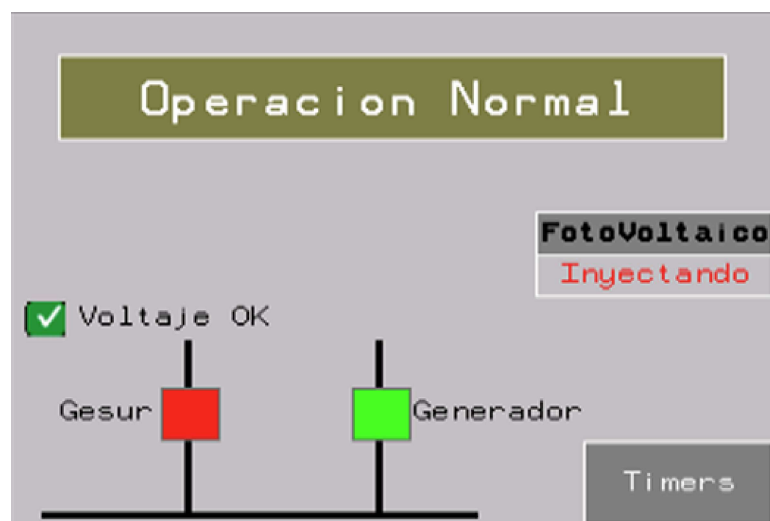
## Ejemplo de pantallas en operación normal

En las figuras 30 y 31 se evidencia cómo se ven las pantallas al hacer una maniobra de reconexión a GESUR. En la primera pantalla se puede ver que se entró en operación normal, se indica una parada del generador, la inyección solar está aislada, la celdade GESUR está abierta, la celda del generador está cerrada y se muestra una presencia de voltaje en GESUR. En la segunda pantalla se muestra una reconexión exitosa y la inyección fotovoltaica está alimentando el sistema.

**Figura 30.** Ejemplo de pantallas en proceso de reconexión



**Figura 31.** Ejemplo de pantallas en operación normal



## 7.4. Puesta en marcha

Para la puesta en marcha se realizó una simulación el 5 de mayo del 2024. Se simuló una pérdida de voltaje en GESUR removiendo los fusibles de línea de la acometida principal. Se registró la secuencia de eventos del cuadro 5.

**Cuadro 5.** Registro de eventos de prueba de operación de emergencia

<b>Elemento para verificar</b>	<b>Resultado</b>
Apertura de le Celda GESUR	OK
Aislamiento del sistema fotovoltaico	OK
Arranque remoto del generador	OK
Tiempo de estabilización del generador	OK
Cierra de la celda del generador	OK

Luego se reincertaron los fusibles de línea para simular un regreso de la tensión en GESUR. Los eventos registrados se muestran en el cuadro 6.

**Cuadro 6.** Registro de eventos de prueba de detección de tensión en GESUR

<b>Elemento para verificar</b>	<b>Resultado</b>
Tiempo de trabajo mínimo del generador	OK
Activación de relé de control de tensión GESUR	OK

Al concluirse el tiempo de trabajo mínimo del generador se registraron los eventos descritos en el cuadro 7.

**Cuadro 7.** Registro de eventos de prueba de operación de emergencia

<b>Elemento para verificar</b>	<b>Resultado</b>
Espera de tiempo de estabilización en GESUR	OK
Apertura de la celda del generador	OK
Cierre de la celda GESUR	OK
Activación del sistema fotovoltaico	OK
Tiempo de enfriamiento del generador	OK
Apagado del generador	OK

El procedimiento se realizó dos veces bajo requerimiento del personal del centro comercial, dando ambas pruebas resultados exitosos.

Cabe mencionar que, para la energización del tren de celdas fue necesario realizar pruebas de continuidad y resistencia a los fusibles de media tensión de las celdas de salida.

La realización de estas pruebas no forma parte de los procedimientos realizados en este trabajo. Estas pruebas, junto a las fotografías del tren de celdas pueden ser vistas en la sección de anexos.

---

### Conclusiones

---

1. Con la culminación de este proyecto se obtuvo una transferencia en media tensión automatizada capaz de detectar fallas en la fuente principal de emergencia, con la capacidad de activar y desactivar la inyección solar, controlar los arranques y paradas del generador de emergencia, y hacer la reconexión a la fuente principal de energía una vez restablecido el servicio.
2. El diagrama de disposición física del gabinete de control fue diseñado y realizado en AutoCAD. El diseño fue utilizado por un equipo de técnicos para realizar el ensamble físico de los elementos. En el apartado de anexos se puede ver el ensamble del gabinete de control.
3. El diagrama de flujo describe con precisión los procesos y consideraciones para programar el control de la transferencia automática. El diagrama de flujo puede ser utilizado por el personal del centro comercial para comprender los procesos, operaciones y lógica de la programación de la transferencia automática.
4. La programación para el control de la celda GESUR y la celda del generador de emergencia fue efectiva para realizar los cierres y aperturas, tomando en cuenta los métodos de redundancia física y lógica en programación, para garantizar el buen funcionamiento de la transferencia.
5. Durante un corte de energía en GESUR, el control de la transferencia desactiva de forma exitosa la inyección fotovoltaica por medio de contactores accionados por el módulo de salidas TM3DM8R. De igual forma, al restablecerse el servicio de GESUR, la transferencia vuelve a activar la inyección fotovoltaica de forma segura.
6. Los temporizadores programados para el generador fueron efectivos para garantizar el control, contemplando las sugerencias del fabricante para prolongar la vida útil

y evitar el desgaste innecesario. El control del generador garantiza el respaldo de energía en caso de corte eléctrico en GESUR de forma efectiva y segura.

7. Las pantallas programadas en el HMI son efectivas para transmitir la información actual del sistema a los operarios. Muestran efectivamente los estados y lecturas de cada parte del sistema y comunican de forma eficaz el estado y los procesos de la transferencia.

---

### Recomendaciones

---

Si bien el proyecto se manejó de la forma más eficiente en términos de costos y tiempo, hay algunas consideraciones que se pudieron haber tomado en cuenta. La primer recomendación que se puede hacer es el hacer un estudio exhaustivo para determinar la causa de la falla. Por temas de costos y tiempo, no se pudo realizar este estudio para determinar la falla y atacarla directamente. Un estudio por parte del fabricante Schneider Electric hubiera sido de mucha utilidad.

Dejando de lado la determinación objetiva de la falla, en el manejo de las celdas de la transferencia automática se pudo hacer un control más exhaustivo. El funcionamiento básico de la transferencia es: el relé de presencia de tensión en la celda de GESUR detecta si hay una caída del servicio. Si esto ocurre se hace la maniobra de conexión a la fuente de emergencia. En este punto es donde puede haber una mejora. Cuando el generador arranca hay que esperar un tiempo de estabilización de la señal. Este tiempo puede llegar a ser muy largo y molesto para el centro comercial. Una transferencia automática convencional tiene la capacidad de detectar el nivel de tensión en la fuente de emergencia sin necesidad de esperar un tiempo. Una vez se cumple con la parametrización ingresada en el controlador, se hace la conexión a la fuente de emergencia. En el caso del centro comercial no se podía monitorear al voltaje del generador. Las celdas cuentan con transformadores de potencias que hacen una regla de 3 para convertir el voltaje de 13.8 KV AC a 120 V AC. Estos 120 V AC son los que se envían al relé de presencia de tensión y este activa y desactiva la señal hacia el PLC. Este relé de presencia de tensión solo se usó en la celda de GESUR y no en la del generador, por temas de tiempo y falta de existencias. Es cierto que tener monitoreado la tensión del generador no es vital, pero puede llegar a ser útil tanto para reducir el tiempo de transferencia a la fuente de emergencia, como para determinar si el voltaje entregado por el generador es el correcto o no. Esta información se puede utilizar para crear alarmas tanto en la operación de emergencia, como en las ejercitaciones semanales del generador. De esta forma se pueden tomar acciones preventivas con el generador y asegurar que esté

funcional durante las emergencias.

Otra recomendación que se puede dar es el utilizar un PLC más pequeño. El PLC utilizado tiene, en combinación, 40 entradas y salidas, de las que se usaron poco más de la tercera parte, tomando en cuenta que se agregó un módulo de salidas extras para el control de la inyección fotovoltaica. Se pudo haber utilizado un PLC de la misma línea, pero más pequeño. El PLC anterior era el mismo modelo que se utilizó en este proyecto y el centro comercial quería que fuera el mismo PLC que tenían anteriormente. Por esto, no fue posible usar un PLC más pequeño. Usar un PLC más pequeño también hubiera ayudado al diseño y ensamble del gabinete de control, ya que, con menos entradas y salidas, el gabinete pudo haber sido más compacto y su ensamble se hubiera facilitado de sobremanera.

Como último punto, sería interesante considerar un sistema de sincronismo para todas las fuentes de energía: GESUR, generador e inyección solar, para garantizar que ninguna de estas fuentes pudiera entrar en desfase y evitar apagar la inyección solar durante una operación de emergencia. De esta forma no se desaprovecharía la energía solar en ningún momento. Es cierto que este sistema puede llegar a ser caro y complicado de implementar dadas las diferencias de tensión que maneja la inyección solar y el generador de emergencia, pero valdría la pena explorar estas soluciones.

## CAPÍTULO 10

---

### Referencias

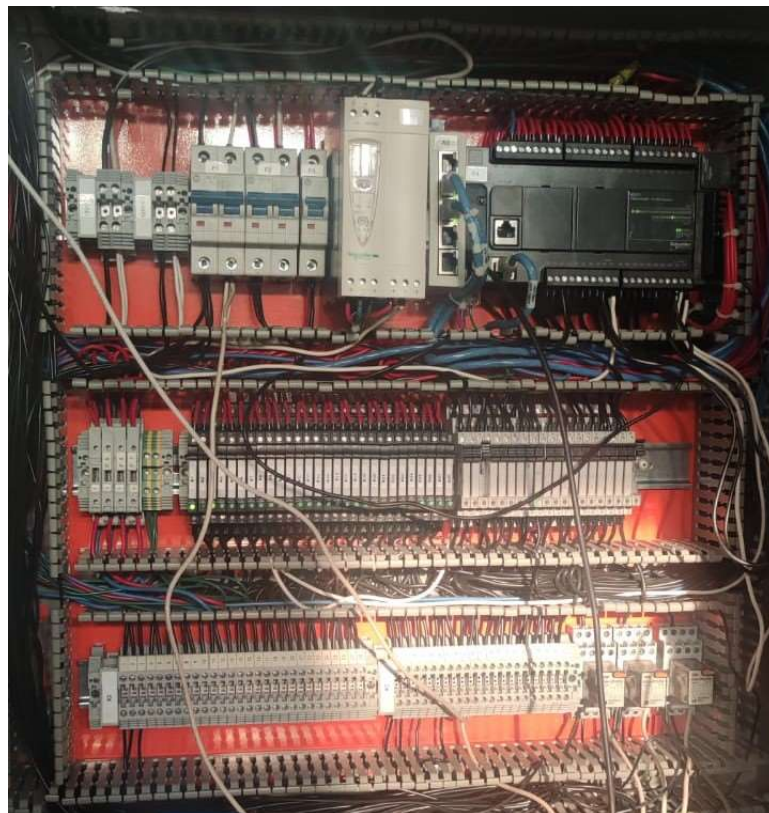
---

- [1] J. Dutton, “Transformer Voltages, Part 1: Analysis of Voltages Listed in ANSI C57, C84, and C92 Standards [Voltajes de transformador, parte 1: Análisis de los voltajes listados en las normas ANSI C57, C84 y C92],” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-16, n.º 1, págs. 8-16, ene. de 1990. DOI: 10.1109/TIA.1980.4503742.
- [2] G. Enríquez Harper, “Guía práctica para el cálculo de instalaciones eléctricas: Basada en las normas técnicas para instalaciones eléctricas,” en México: Limusa, 2004, pág. 109.
- [3] EUR, “Directiva 2001/58/CE,” *EUR-Lex*, jul. de 2001, Disponible en línea en EUR-Lex.
- [4] S. Electric, *SM6 Solución Modular - Catálogo 2022*, Disponible en: <https://www.se.com/sm6>, France, 2022.
- [5] A. P. Technologies, *ASCO SERIES 300 Group G Controller Upgrade [Actualización del controlador Grupo G ASCO SERIE 300]*, Publication 2002, Disponible en: [urlhttps://www.ascopower.com](https://www.ascopower.com), 160 Park Avenue, Florham Park, NJ 07932, 2017.
- [6] N. B. Mbonu, M. R. Usikalu, W. A. Ayara y L. N. Obafemi, “Design and Construction of Automatic Transfer Switch [Diseño y construcción de un interruptor de transferencia automática],” *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 14, n.º 22, págs. 3906-3909, nov. de 2019.
- [7] B. Brown y J. Guditis, “Critical-Power Automatic Transfer Systems - Design and Applications [Sistemas de transferencia automática para energía crítica: diseño y aplicaciones],” *Square D Critical Power Competency Center*, págs. 2-10, 2006.

- [8] A. P. Technologies, *Group G Controller for ASCO Automatic and Non-Automatic Transfer Switches: User's Guide [Controlador Grupo G para interruptores de transferencia automáticos y no automáticos de ASCO]*, 381333-400 H, Available from ASCO Power Technologies., Square D Critical Power Competency Center, oct. de 2018.
- [9] A. P. Technologies, *Transition Mode Basics [Fundamentos del modo de transición]*, [urlhttps://www.ascopower.com/us/en/resources/technical-briefs/transition-mode-basics.jsp](https://www.ascopower.com/us/en/resources/technical-briefs/transition-mode-basics.jsp), Accessed: 2024-09-23, 2023.
- [10] A. P. Technologies, *Transferring Motor Loads Between Power Sources [Transferencia de cargas de motores entre fuentes de energía]*, White Paper 119, Available at: [urlhttps://www.ascopower.com](https://www.ascopower.com), 160 Park Avenue, Florham Park, NJ 07932, 2020.
- [11] R. Imre, "Improvement of the Reliability of Emergency Generators [Mejora de la confiabilidad de los generadores de emergencia]," *Department of Electrical Machines*, vol. 37, n.º 4, págs. 1-10, 1993.
- [12] I. Pereda, "Celdas Fotovoltaicas en Generación Distribuida," *Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Industrial Mención Electricidad*, 2005, Profesor Supervisor: Juan W. Dixon.
- [13] D. Blas Martínez, "Energía Solar Fotovoltaica: Instalación de Paneles Fotovoltaicos en Bosal S.A.," *Proyecto Fin de Carrera, Ingeniería Técnica Industrial, Electrónica*, 2011, Director: Miguel Ángel Torres.
- [14] E. G. Walters y E. J. Bryla, "Software Architecture and Framework for Programmable Logic Controllers: A Case Study and Suggestions for Research [Arquitectura de software y marco de trabajo para controladores lógicos programables: un estudio de caso y sugerencias para la investigación]," *Machines*, vol. 4, n.º 13, págs. 1-14, 2016. DOI: 10 . 3390 / machines4020013. dirección: <https://www.mdpi.com/2075-1702/4/2/13>.
- [15] S. Electric, *Modicon M221 Logic Controller - TM221CE40T: Product Datasheet [Controlador lógico Modicon M221 - Hoja de datos del producto]*, Available at: [urlhttps://www.se.com](https://www.se.com), Rueil-Malmaison, France, 2024.
- [16] S. Electric, *Modicon TM3 - Módulo TM3DM8R: Product Datasheet [Modicon TM3 - Módulo TM3DM8R: Hoja de datos del producto]*, Available at: [urlhttps://www.se.com](https://www.se.com), Rueil-Malmaison, France, 2024.
- [17] N. Instruments, "What is the Modbus Protocol and How Does It Work? [¿Qué es el protocolo Modbus y cómo funciona?]" *Technical Paper*, 2023, Accessed: October 2024. dirección: <https://www.ni.com>.
- [18] O. Yerima e I. Chibuisi, "TCP/IP Protocol: A Suitable Communication Network [Protocolo TCP/IP: Una red de comunicación adecuada]," *International Journal of Engineering and Technical Research (IJETR)*, vol. 2, n.º 8, págs. 216-219, ago. de 2014, ISSN: 2321-0869. dirección: <http://www.erpublication.org>.

- [19] S. Electric, *ConneXium - Conmutador TCP/IP Ethernet, 5 puertos para cobre - TCSESU053FN0: Product Datasheet [ConneXium - Conmutador TCP/IP Ethernet, 5 puertos para cobre - TCSESU053FN0: Hoja de datos del producto]*, Available at: [urlhttps://www.se.com](https://www.se.com), Rueil-Malmaison, France, 2024.
- [20] S. Electric, *Harmony HMI STO y STU - HMISTU655: Product Datasheet [Harmony HMI STO y STU - HMISTU655: Hoja de datos del producto]*, Available at: [urlhttps://www.se.com](https://www.se.com), Rueil-Malmaison, France, 2024.

**Figura 32.** gabinete de control en pruebas



**Figura 33.** Inicio de trabajos de montaje de tren de celdas



**Figura 34.** Trabajos de conexión entre celdas



**Figura 35.** Instalación de fusibles en celdas de salida



**Figura 36.** interior de celda de salida tipo desconector con fusible



**Figura 37.** Realización de pruebas de resistencia en fusibles



**Figura 38.** Tren de celdas instalado en cuarto eléctrico de centro comercial



**Figura 39.** Energización de tren de celdas

