

SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS DE GRAN CAPACIDAD Y ALTA CONFIABILIDAD

Hugo Rojas Espinoza - hrojas@cime.com.pe; hrojase@uni.pe
Jafett Rolando Vergara Prado - jvergara@cime.com.pe
CIME Comercial S.A. - Departamento de Ingeniería
Dirección: Av. Industrial 132, ATE. Lima-Perú
3. Conversión Fotovoltaica de la Energía Solar.

Resumen. *Este artículo muestra algunos conceptos y técnicas utilizados durante el diseño y selección de componentes para sistemas solares fotovoltaicos de gran capacidad y alta confiabilidad, así como, la experiencia en tres recientes proyectos ejecutados. Se describe el diseño final, los problemas presentados y los criterios técnicos seguidos en el proceso de diseño.*

Palabras-clave: *Energía Solar Fotovoltaica, Confiabilidad, Seguridad.*

1. INTRODUCCION

Para la industria en aplicaciones que brindan el soporte de energía con sistemas solares fotovoltaicos, estos requieren - dependiendo de su función- ser muy confiables. Estos sistemas deben estar diseñados para operar dentro de ciertos rangos de voltaje, intensidad, frecuencia y con baja distorsión de los niveles de voltaje. Además cada componente debe operar bajo condiciones ambientales especificadas por el fabricante. La operación fuera de los rangos, la selección inadecuada de los componentes y/o materiales puede resultar en pérdidas, baja eficiencia y operación impredecible y defectuosa. Es por esto que el SFV deberá estar diseñado siguiendo criterios de balance de energía, fiabilidad de componentes y seguridad de manera que pueda brindar confiabilidad de acuerdo a la función para la cual brinda soporte.

2. CONFIABILIDAD DE LOS SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS

En la EN 60300-1:1993, la confiabilidad se define como el conjunto de propiedades que describen las características de disponibilidad y los factores que la condicionan: Fiabilidad, Mantenibilidad y logística de Mantenimiento. Además de aclarar que la confiabilidad se emplea únicamente para descriptores generales, sin carácter cuantitativo. En la UNE 21-302-92/191, la fiabilidad se define como la actitud de un elemento para realizar una función requerida, en condiciones dadas durante un intervalo de tiempo dado.

En una tesis doctoral (Pablo Díaz, 2003) sobre la confiabilidad para los sistemas solares fotovoltaicos para electrificación rural se destaca su importancia, cuando al respecto de ellos se menciona; ‘...a lo largo del texto han surgido ya diversos aspectos de importancia de los sistemas energéticos: seguridad, fiabilidad, mantenimiento y disponibilidad en el suministro. Si bien son aspectos diferenciados, están, en la práctica, relacionados entre sí. Todos estos términos se pueden englobar en el concepto de confiabilidad (dependability, en inglés)... Es un término general, no cuantificable por sí mismo, si bien sí son cuantificables los componentes de fiabilidad y tiempo de mantenimiento, que derivan en la disponibilidad del sistema.’

En la práctica en los sistemas de energía no convencionales las interrupciones ocasionadas por fallas en el sistema de energía o por baja calidad eléctrica son inconvenientes y pueden ser muy serios si no se han tomado las provisiones suficientes. Es debido a la importancia de la función que respalda el Sistema Solar Fotovoltaico (SFV) que se diseñan considerando criterios de confiabilidad que incluyen la tolerancia a fallas, redundancia y disponibilidad.

El diseño del sistema empieza considerando el lado de carga o consumidores. El grupo de consumidores de energía eléctrica (comerciales e industriales) que respalda un SFV requieren cierta calidad eléctrica. Dentro de ese grupo existen consumidores que requieren una calidad eléctrica superior a la que puede ser suministrada por un sistema convencional y no convencional. A menudo el requerimiento de energía de tales equipos es pequeño y puede ser satisfecho por sistemas de baja capacidad. En el mercado existe una amplia variedad de dispositivos de respaldo de energía, la correcta elección del sistema dependerá de las características del equipo(s) a proteger, de la autonomía que es requerida y lo relevante de la función que cumple. En la Tab.1 se puede apreciar una clasificación de la prestigiosa PowerQuality.

Tabla 1.- Categoría de consumidores de energía eléctrica en relación a los requerimientos de confiabilidad del suministro eléctrico.

Categoría	REQUERIMIENTOS DE CONFIABILIDAD	POSIBLE SOLUCIÓN	TIPOS DE CONSUMIDOR
I Básico	Interrupciones y fallas en el suministro eléctrico pueden ser relativamente largas, i.e. varios minutos.	Línea de la red de distribución eléctrica. Suministro de energía <i>standby</i> (i.e. baterías) no es requerido.	Casas habitación.
II Intermedio	Interrupciones y fallas en suministro eléctrico deben ser limitadas a unos pocos segundos.	Planta de emergencia (P.E.). Alumbrado de emergencia.	Cines, centros comerciales, tiendas de autoservicio, etc.
III Alto	Interrupciones y fallas en el suministro eléctrico deben ser limitadas al rango de duración comprendido entre unos cuantos milisegundos hasta un segundo.	Dos líneas de la red de distribución eléctrica independientes. P.E. Sistema de respaldo de energía equipado con transferencia automática.	Hoteles, Edificios de Corporativos, etc.
IV Muy Alto	Suministro ininterrumpible de energía. Las fallas de energía en determinadas cargas no son toleradas.	Sistema redundante de respaldo de energía con cero tiempos de transferencia acoplados a una P.E. para total independencia.	Bancos, aeropuertos, hospitales, centrales de comunicación de alto tráfico (Core, Hub-Dama).

Power Quality

2.1. Tolerancia A Fallas

Un sistema con tolerancia a fallas (Resiliente) es aquel que puede soportar fallas en los dispositivos y/o sub-sistemas sin interrupción de la operación normal. Esto puede ser logrado instalando equipo adicional de respaldo (redundancia), aunado a un diseño cuidadoso y a un buen plan de mantenimiento.

Los elementos esenciales de una instalación tolerante a fallas son:

- Redundancia
- Eliminación de los puntos de falla
- Buen programa de mantenimiento

2.2. Disponibilidad

‘La disponibilidad es una medida de la proporción de tiempo que la instalación está en condiciones de generar electricidad y es, por tanto, independiente de si en ese momento se requiere o no su operación por demanda de consumo. Es el factor de utilización de la instalación el parámetro que expresa el tiempo que el sistema está realmente generando electricidad. La disponibilidad de una instalación reparable depende por un lado de su fiabilidad, del número de averías y/o desconexiones que sufra y, por otra, del tiempo de parada por mantenimiento. [...] Es la valoración conjunta de varios factores la que determina las características del sistema; en resumen, es la disponibilidad el parámetro de evaluación cuantitativa final del análisis de confiabilidad de sistemas.’ (Pablo Díaz, 2003).

Es por lo anterior que durante su operación, el SFV deberá ser capaz de responder a la solicitud de energía del consumidores durante el tiempo de diseño que determine el consumo diario, esta capacidad de suministro sin fallas y sin cortes dependerá del las consideraciones en el diseño, siendo lo ideal; que no se presenten. Esto obliga, para sistemas de alta confiabilidad, un diseño para el escenario que presente mayores problemas y desventajas, para el ‘peor día’.

2.3. Redundancia

Redundancia Pasiva (standby). Significa que un medio alterno para ejecutar alguna función específica está disponible pero es inoperante hasta que es requerido.

La desventaja de los sistemas redundantes pasivos es que es inevitable un periodo de interrupción entre el instante de la falla y el momento en que es reemplazada la unidad dañada. Tales esquemas no son satisfactorios para sistemas críticos en los actuales entornos remotos, aislados y sin accesos luego de largos periodos después del corte.

Sistemas redundantes en paralelo o activos. Todas las unidades operan simultáneamente. El esquema más obvia es aquel en que se tienen dos módulos de potencia (en analogía con los UPS), cada uno capaz de proveer por sí sólo la

energía a la carga total del sistema, de tal manera que si uno de ellos falla, el otro soportará la carga conectada. Este esquema es referido como **redundancia 1+1** (Fig. 1).

Un enfoque alternativo consiste en dividir la carga total entre un número determinado de módulos de potencia, cada uno capaz de soportar solo una fracción de la carga, y proveer solo una unidad redundante adicional. Este enfoque es referido como **redundancia N+1**. Para respaldar cargas críticas, deben considerarse más de un módulo redundante adicional (N+X).

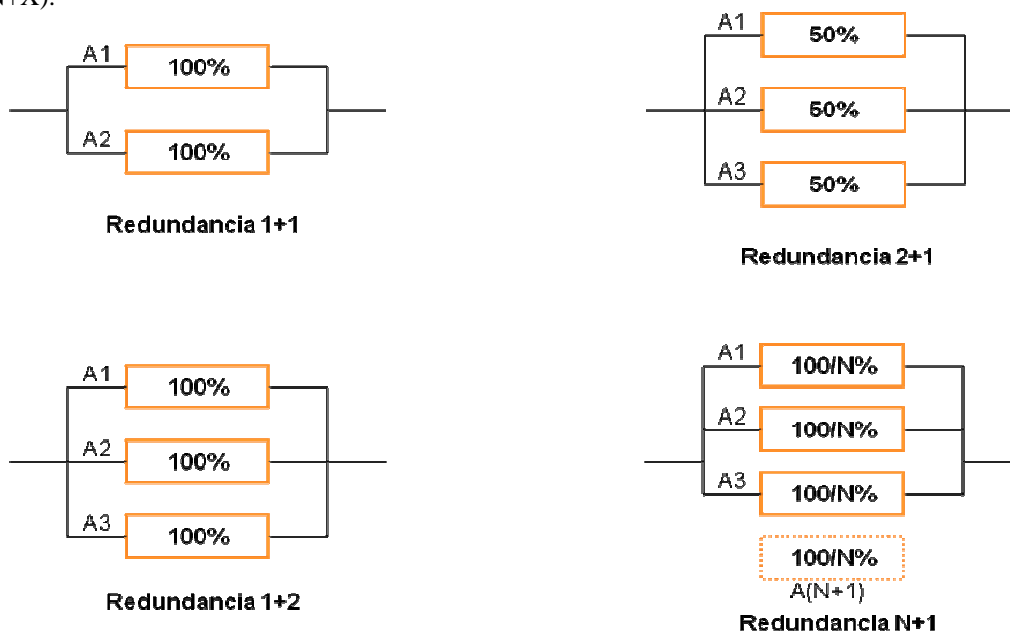


Figura 1 – Ejemplos de redundancia activa

La redundancia es un método útil para incrementar la disponibilidad y optimizar el balance entre la efectividad de la operación y la inversión. Equipos o componentes son instalados para asegurar que en caso de alguna falla en algún segmento del sistema, la funcionalidad sea preservada. El nivel y tipo de redundancia determina el grado de disponibilidad del sistema, el tipo de fallas permitidas y se minimicen al máximo. Desde el punto de vista de operación del sistema crítico dentro del sistema en el controlador.

3. SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS REDUNDANTES

En un sistema con cargas críticas (centro de emergencia) o cargas que permanentemente tienen que funcionar es aconsejable emplear dos reguladores para tratar de lograr cierto nivel de redundancia. Es decir, en caso de fallar un regulador el otro continúa trabajando al 100% hasta que la falla sea detectada y se establezca la solución al regulador deteriorado.

Se habla de redundancia en la parte de carga de batería y de redundancia en la parte de suministro energético hacia los equipos consumidores de energía. Es decir, en cada una de las dos funciones básicas y primordiales de un regulador fotovoltaico de carga y descarga. Una redundancia en la parte de carga de batería no es factible a menos de que se empleen dos o más reguladores y a los que sólo se les pueden conectar paneles fotovoltaicos que no produzcan más de la energía que cada regulador pueda manejar. Es decir que cada regulador dispone de sus paneles fotovoltaicos y con los que se carga una batería en común. En caso de fallar un regulador el otro regulador continuará cargando la batería con el máximo de energía que los paneles conectados al regulador pueden producir.

Una redundancia en la parte de suministro energético es factible de utilizarse dos o más reguladores y algunos diodos como se aprecia en la Fig.1. Es decir que en caso de fallo de uno de los reguladores el otro regulador continúa suministrando energía al máximo de su límite de entrega de corriente continua.

Un sistema redundante busca mantener las cargas funcionando el mayor tiempo posible hasta el límite máximo de las posibilidades técnicas existentes. Es decir que de fallar un regulador el sistema fotovoltaico continuará cargando baterías no al 100% sino al 50% de su capacidad como también continuará suministrando energía hacia los equipos al 50%.

Así como es relevante mantener funcionando el sistema el máximo tiempo posible hasta llegar a un nivel crítico (desconexión de los equipos consumidores de energía) es importante transmitir información del sistema al administrador del mismo para que ésta información sea analizada y puedan tomarse los correctivos del caso antes de que se desconecten parte de las cargas o todas las cargas. Para tal propósito es necesario el empleo de dispositivo que permita la transmisión y/o almacenamiento de datos de manera remota.

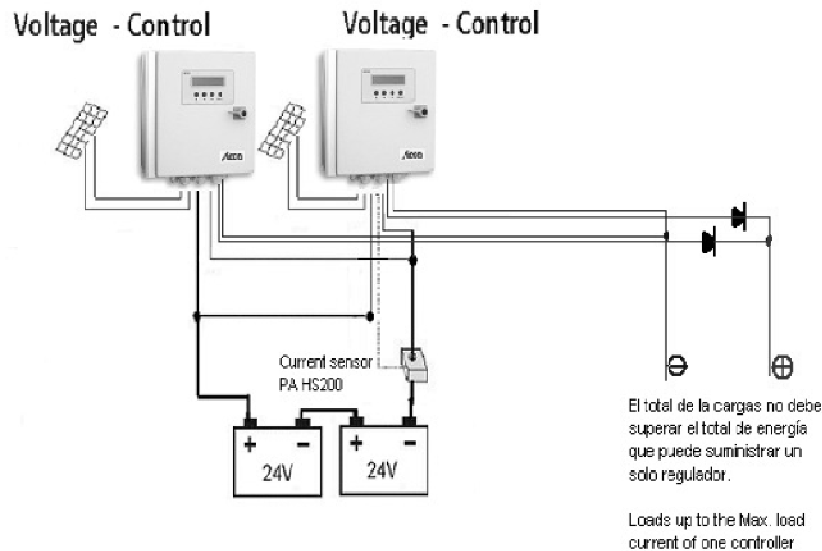


Figura 1 – Redundancia en la parte de consumidores

4. IMPLEMENTACIÓN DE PROYECTOS

4.1. Diseño del Sistema

Dimensionado del banco. Una vez conocido el requerimiento diario de energía se procede a calcular la capacidad del banco de baterías con la siguiente relación.

$$C_{Banco} = \frac{n \times C_{Diaria}}{PD_{M\acute{a}x}} \quad (1)$$

Donde, C_{Banco} : Capacidad nominal mínima de la batería (Ah), C_{Diaria} : Carga eléctrica diaria requerida (Ah), n : Autonomía(días), $PD_{M\acute{a}x}$: Profundidad de descarga máxima de la batería(%).

La capacidad final del banco está en función de la autonomía y la profundidad de descarga. Reacomodando la Ec.(1) podemos obtener:

$$C_{Banco} = \frac{C_{Diaria}}{PD_{Diario}} \quad (2)$$

Donde;

$$PD_{Diario} = \frac{PD_{M\acute{a}x}}{n} \quad (3)$$

La Ec.(3) es utilizada para calcular la profundidad de descarga diaria a la que estaría sometido el banco de baterías, así podemos estimar número de ciclos que obtendremos, esto nos permitirá obtener referencia de la vida útil del banco de baterías.

Selección del controlador. Dentro del sistema la unidad de control tiene como principal componente al controlador solar de carga, esta unidad representa un punto crítico porque realiza funciones de control en la línea de potencia y supervisión de valores de funcionamiento. Además de los valores de capacidad y voltajes de operación. Se deberá tener en cuenta las protecciones con que cuenta, las características de control (Voltaje o SOC), la capacidad de comunicación y monitoreo.

Selección del Inversor. Dentro del sistema, cuando es necesario, la unidad de transformación deberá ser adecuada para el nivel de voltaje y frecuencia requerida por los consumidores suministrando la potencia requerida por estos, aún más, dependiendo del tipo de consumidores deberá ser capaz de sobrecargas(corrientes de arranque, por ejemplo).

Selección del lugar de instalación. El lugar de instalación deberá obedecer a un estudio de sombras. Esto evitará que durante el día no exista sombra durante el día. A continuación la Fig. 2 muestra el requerimiento de espacios y distancias para la ubicación equipos y el arreglo solar.

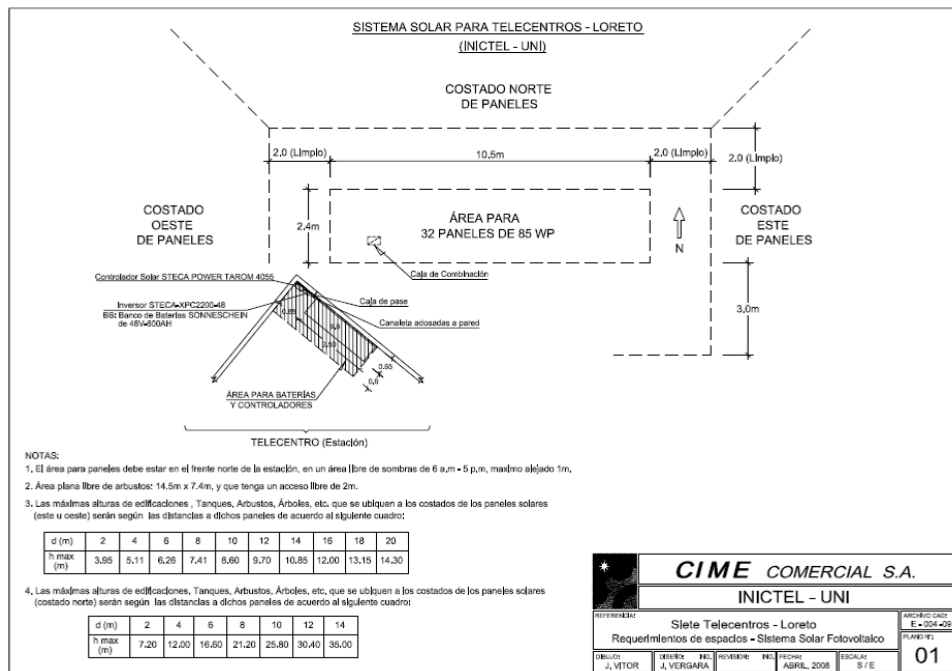


Figura 2 – Requerimientos de espacio para el sistema solar fotovoltaico

Cajas de paralelismo (Cajas PAC'S). Fabricada de manera exclusiva en la planta de CIME, de gabinete metálico o fibra de vidrio con IP 55 mínimo, conteniendo en su interior dos dados de aluminio electrolítico sobre una base aislante y una bornera para la tierra, en su interior también se coloca un elemento de seguridad (Arrester) que protege al sistema de voltajes y corrientes elevados, permite el paralelismo de hasta 15 entradas positivas y negativas.

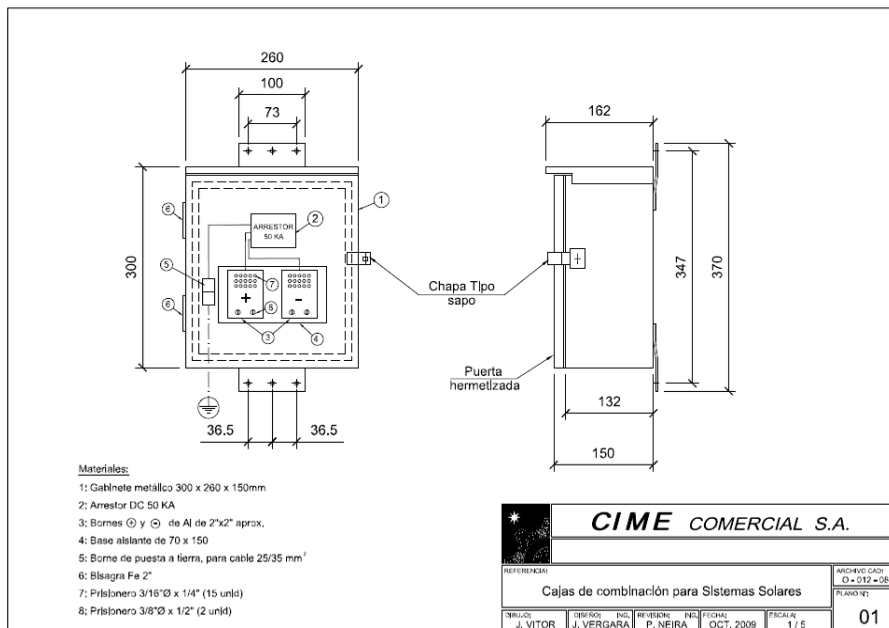


Figura 3 – Diagrama detalle de las cajas PAC's

5. SISTEMA SOLARES INSTALADOS

5.1. Sistema Fotovoltaico para Puestos Militares De Vigilancia

Potencia: 5610Wp, Capacidad: 1200Ah@C100 Controlador: 110 A – 48VDC, Aplicación: Comunicación, Refrigeración, Iluminación, Entretenimiento. Monitoreo: Local, Autonomía: 5 días, Categoría: II, Requerimientos del cliente: Fácil y rápida instalación y montaje, largo periodo de vida útil, alta capacidad de sobrecarga, mediana confiabilidad.

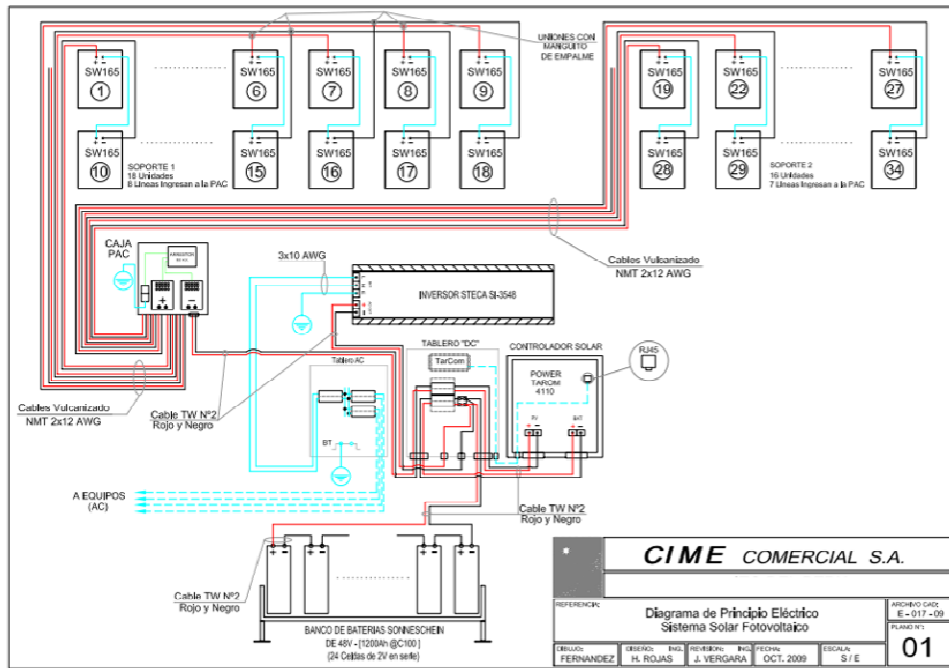


Figura 4 – Diagrama de principio eléctrico

5.2. Sistema Fotovoltaico para Telecentros

Potencia: 2720W_p, Capacidad: 600Ah@C100, Controlador: 55 A – 48VDC, Aplicación: Comunicación, telefonía IP e Internet. Monitoreo: Local, Autonomía: 4 días, Categoría: III, Requerimientos del cliente: Fácil y rápida instalación y montaje, largo periodo de vida útil, alta capacidad de sobrecarga, mediana confiabilidad.

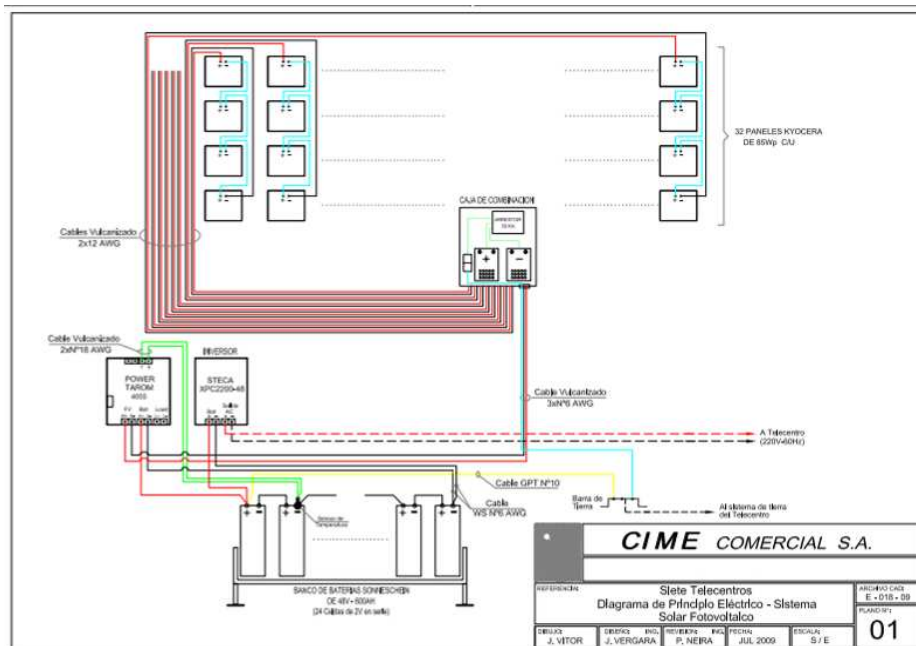


Figura 5 – Diagrama de principio eléctrico

Dificultades. El sistema fue requerido para cubrir determinada demanda energética diaria, pasados 5 meses, esta demanda aumento. Esto ponía en riesgo la sostenibilidad del programa, el cual tenía proyectado un periodo de 8 años aprox. para la primera reposición de baterías. La solución debería plantearse sin disminuir este periodo y el número de horas en que los usuarios hacían uso del sistema.

Solución. Dentro del diagrama de principio eléctrico de la Fig. 5 notar la existencia de un inversor el cual provee a los equipos la tensión en 220VAC-60Hz. En el lugar de instalación, la localidad dispone de energía eléctrica dada por un generador diesel en las noches por un periodo de entre 3 a 4 horas. Este inversor es en realidad un inversor/cargador y permite la entrada de energía convencional para recargar el banco de baterías y alimentar a las cargas en forma paralela (De manera análoga a un UPS online). Considerando la existencia de energía eléctrica y realizando el balance energético se decidió que la mejor solución era utilizar la parte de cargador del equipo para cubrir el déficit diario de energía diario

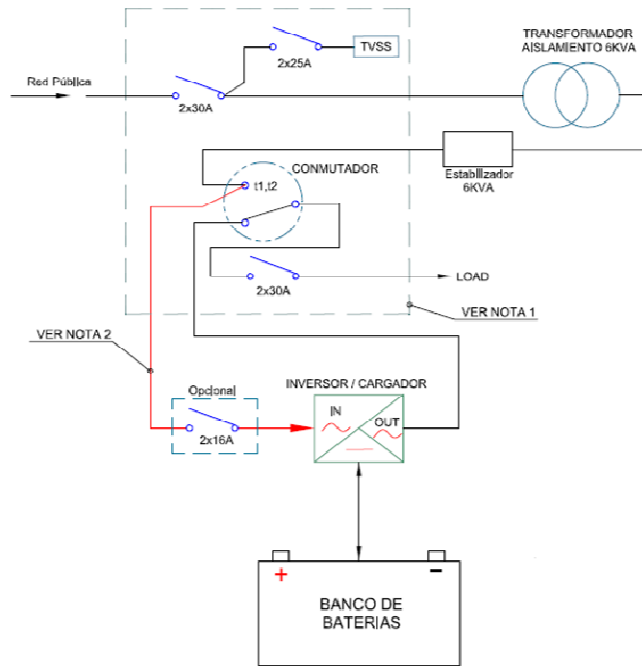


Figura 6 – Diagrama de principio eléctrico

5.3. Sistema Fotovoltaico para Estaciones de Comunicación

Potencia: 4420Wp, Capacidad: 2300Ah@C100, Controlador: 2 x 80 A – 48VDC – Redundante, Aplicación: Comunicación – Estación de Radio Enlace. Monitoreo: Remoto, Autonomía: 8 días, Categoría: IV, Requerimientos del cliente: Instalación y montaje a prueba de robos, monitoreo remoto en tiempo real, muy largo periodo de vida útil, muy alta confiabilidad, solución implementada en menos de 4 meses por tiempos del proyecto.

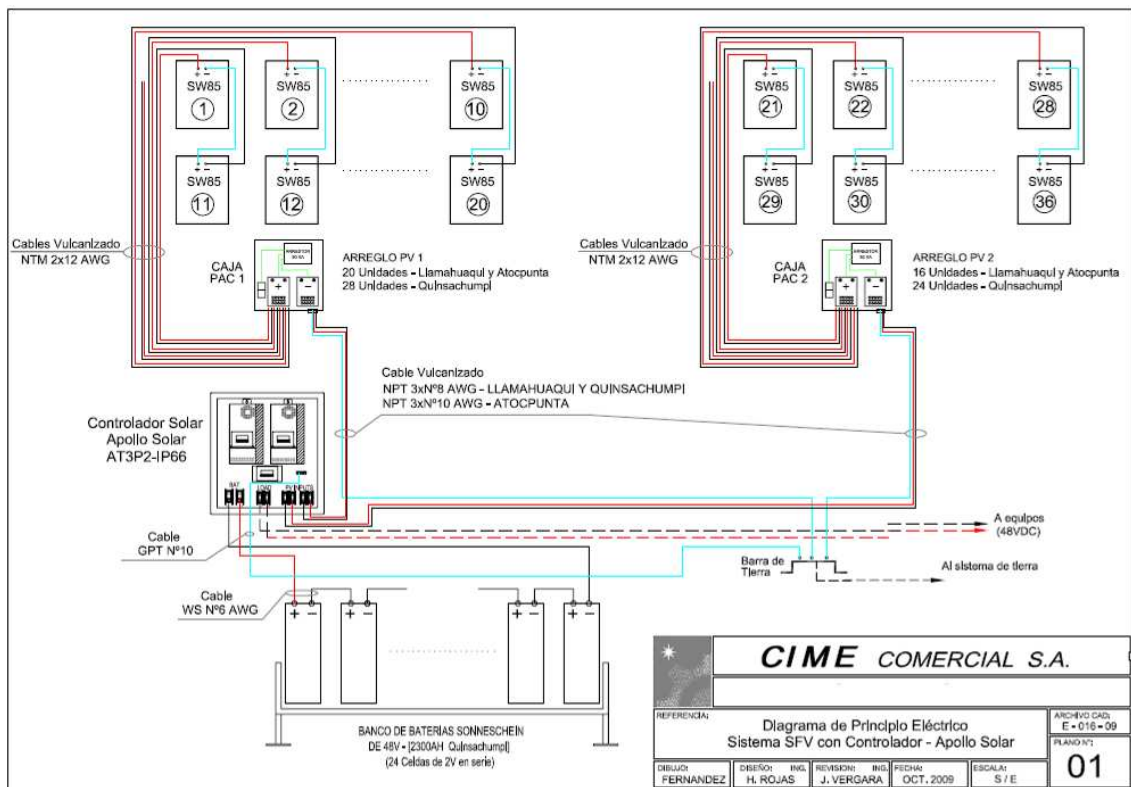


Figura 5 – Diagrama de principio eléctrico

Dificultades. El sistema requerido por el cliente solicitaba un sistema redundante por la alta confiabilidad necesaria para la red de comunicación que daba soporte. Para sistemas fotovoltaicos el término redundante el requisito 1+1 en controladores no estaba desarrollada hasta hace algunos años por lo que los fabricantes no poseen un producto con estas características, control en comunicación y control en la línea de fuerza.

Las Fig. 7, 8 y 9 muestran la solución redundante considerada por los dos fabricantes del mercado. En la Fig.7 y 8, del fabricante 1, podemos ver que se cumple la redundancia en el lado de consumidores, sin embargo, serían necesarios dos puertos de comunicación para mantener activo el monitoreo de cada uno, el switch existente tenía solamente un puerto disponible.

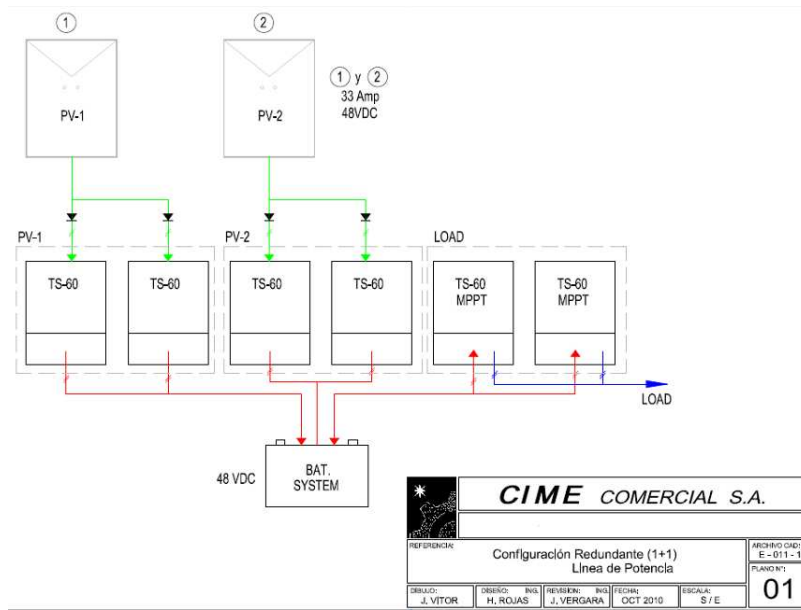


Figura 7 – Fabricante #2, redundancia en línea de fuerza en generadores y consumidores.

En la Fig. 8 observamos la redundancia en comunicación, se puede ver la inclusión de dispositivos conversores de protocolo (RS232-RS485), además se requería una fuente externa para alimentar estos conversores. La decisión de no proceder con esta solución resulta del inconveniente que el modelo C8 que permite la comunicación bajo cierto protocolo estaba preparado para lanzarlo al mercado en 6 meses futuros, cuando se requería la solución en 4 meses.

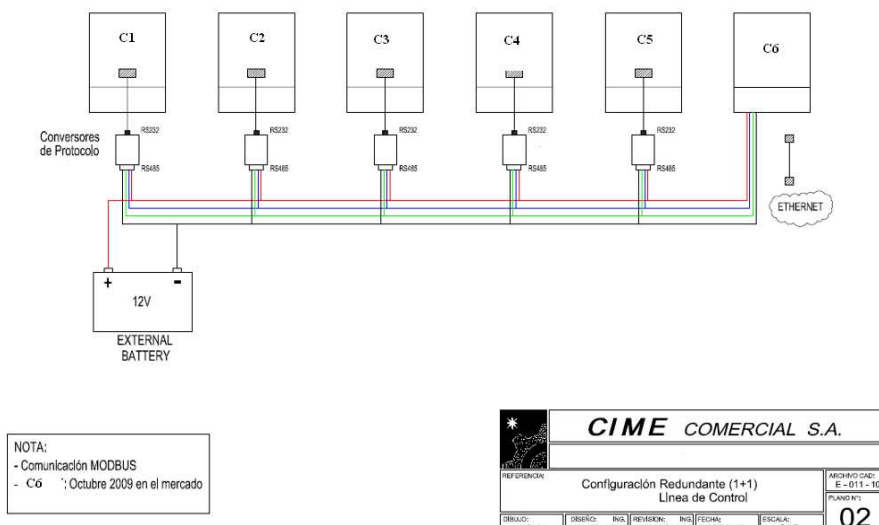


Figura 8 – Comunicación entre unidades conectadas en paralelo

Solución. En la Fig. 9 apreciamos la posibilidad que propone el fabricante #2 de un fabricante de controladores MPPT que da solución al tema de redundancia conectando unidades MPPT en paralelo a una misma batería, son un solo canal de comunicación. La mejora que implementa el algoritmo MPPT permite asegurarnos un mejor

eficiencia de conversión, mientras se realiza la recarga de baterías, esto nos da, basados en un dimensionado de Ah, un margen de carga que permitirá cargar la unidad en menos tiempo y/o tener un superávit de Ah al final del ciclo de diseño, aumentando la confiabilidad de este.

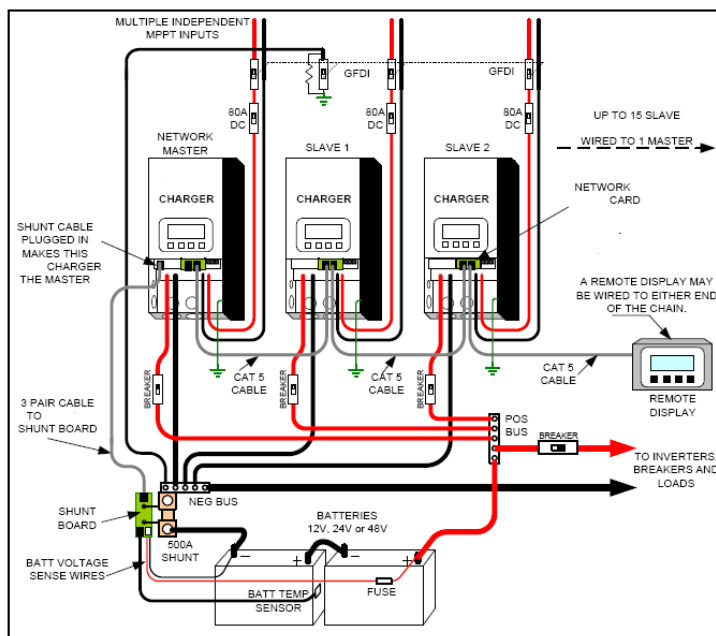


Figura 9– Controlador MPPT redundante en el lado de consumidores, con monitoreo remoto independiente en una misma red.

La solución final permite al usuario del sistema monitorear las funciones del mismo, cuando uno de los módulos del controlador cae el segundo controlador seguirá informando, dará la alerta para proceder a corregir la alarma y dará tiempo suficiente para llegar al sitio a proceder con los trabajos correctivos.

6. CONCLUSIONES

La confiabilidad involucra elementos de seguridad en cada línea del sistema, esto con la final de brindar al sistema la tolerancia a fallas, para esto también se deberá considerar que muchos fabricantes ya incluyen elementos de protección dentro de las características técnicas del mismo.

La vida útil del banco de baterías, puede ser estimada con la información de ciclado que nos brinda el fabricante, este valor es información referencial de diseño que estará sujeta a la temperatura promedio de operación según la Ley de Arrhenius.

Para obtener mayor confiabilidad en el SFV, éste deberá brindar un control paralelo redundante (1+1) en el sistema a fin de obtener un mayor nivel de confiabilidad.

Mientras más componentes tengan un sistema, el riesgo de fallas se incrementa y si los componentes vienen colocados en cascada este riesgo aumenta. Todos los elementos a utilizarse dentro del sistema deberán obedecer una relación de coste/confiabilidad. De esta manera podremos evitar la inclusión de accesorios innecesarios y su consideración durante el diseño.

REFERENCIA

- Diaz Villar, Pablo, Madrid, 2003. Confiabilidad de los Sistemas Fotovoltaicos Autónomos: Aplicación a la Electrificación Rural, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, España.
- Luque, Antonio and Hedegus Steven, C. 2003. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, Instituto de Energía Solar, Universidad Politécnica de Madrid - Spain, Institute of Energy Conversion, university of Delaware –USA, John Wiley & Sons.
- IEEE Standards Coordinating Committee 21, C.1998, IEEE Guide for Terrestrial Photovoltaic Power System Safety, The institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. USA.
- Wiles, John, C.1996, Photovoltaic Power Systems and The national Electrical Code: Suggested Practices, Sandia Report, Southwest Technology Development Institute, New Mexico California.
- David, Chapman; Cost of Poor PQ (white paper); Copper Development Association.
- Johan Driesen, Marcel Didden, Ronnie Belmans; Cost of Poor PQ in Information Technology (white paper); K.U.Leuven – ESAT/ELECTA.
- R. Billinton – R. Allan, C.1984, Reliability Evaluation of Power Systems, 2nd Ed., Pitman books Limited, USA,
- Lonie, Bruce; Shaughnessy, Tom; Dranetz-BMI Handbook of Power Quality Analysis.

European Standard supersedes BS 5750-14:1993, IEC 60300-2, ISO 9000:2000, ISO 9001:2000, ISO 9004:2000, Dependability management - Part 1: Dependability management systems.

Abstract. *For industrial applications that provide energy support for solar photovoltaic energy systems, they require - depending on its function, be very reliable. These systems must be designed to operate at certain ranges of voltage, current, frequency and low distortion of voltage levels. Moreover, each component must operate under environmental conditions specified by the manufacturer. Operation outside of the ranges, the improper selection of equipment and materials may result in losses, low efficiency and unpredictable and faulty operation. This article describes the experience in three recent projects carried out, the criteria and techniques followed in the design process.*

Key-words: *Solar Energy Photovoltaic, Reliability, Safety.*