

Diseño de un sistema fotovoltaico para la ladrillera Arcillas Santa Rosa comparando el impacto Técnico y económico del uso de inversores contra el uso de microinversores

Jose Fernando Romero Fuentes

Brayan Yesid Quiñonez Sequeda

Trabajo de grado para optar el título de ingeniero eléctrico

Director

Rolando Andrés Rincón Saravia

Magíster en Dirección de Empresas

Codirector

Oscar Arnulfo Quiroga Quiroga

Doctor en Tecnología

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica de Telecomunicaciones

Ingeniería Eléctrica

Bucaramanga

2026

Agradecimientos

Llegar hasta este punto no fue tarea fácil, y por eso quiero agradecer de corazón a quienes estuvieron conmigo en cada paso:

A mis padres, gracias por todo lo que han hecho por mí. Su apoyo no solo fue económico, sino también lleno de amor, palabras de aliento y fe en mis capacidades. Gracias por enseñarme el valor del esfuerzo y por darme las herramientas para construir mi futuro, este título es para ustedes.

A mis compañeros, gracias por ser más que amigos, una verdadera familia. Gracias por la ayuda, los consejos y por tenderme la mano cuando me enfrentaba a dificultades; sin ustedes hubiera sido mucho más difícil llegar a la meta.

A mi pareja, gracias por ser mi fuente de energía y mi motivación más grande. Gracias por tu apoyo incondicional, por escucharme, comprenderme y darme la fortaleza necesaria para no rendirme nunca. Tu amor fue mi mejor impulso.

Brayan Quiñonez.

La culminación de este trabajo de grado y de mi etapa universitaria no es un logro individual, sino el resultado del esfuerzo, el apoyo y la confianza de personas fundamentales en mi vida, a quienes quiero dedicar este proyecto.

A mis padres, por ser el motor principal de mi vida y mi mayor ejemplo a seguir. Gracias por creer en mí desde el primer día, por su amor infinito y por cada sacrificio silencioso que hicieron para que yo pudiera alcanzar este sueño. Todo lo que soy y lo que he logrado es el reflejo de su dedicación y valores. Este título es tan mío como de ustedes.

A mis abuelos, por ser la raíz de nuestra familia y una fuente inagotable de ternura y sabiduría. Gracias por acompañarme siempre con sus bendiciones, por sus consejos llenos de experiencia y por ser ese refugio seguro que me dio tranquilidad y aliento en los momentos más exigentes de la carrera.

A mi novia, por su paciencia, comprensión y compañía constante. Gracias por ser mi apoyo emocional durante las largas noches de estudio, los momentos de estrés y por creer en mí incluso cuando el camino parecía difícil.

A mi tío Carlos, colega y referente. Gracias por ser esa guía indispensable a lo largo de toda mi formación académica. Tu ejemplo como ingeniero eléctrico fue la motivación que necesité para enamorarme de esta profesión y llegar hasta aquí.

Finalmente, quiero expresar mi profundo agradecimiento al Ing. Jaime Reyes. Su acompañamiento fue fundamental para el desarrollo de este trabajo de grado; gracias por su disposición, por compartir su experiencia y por ser la base técnica que hizo posible materializar este proyecto.

A todos, infinitas gracias.

Jose Romero

Tabla de contenido

Introducción	9
1. Descripción del proyecto	10
1.1 Objetivo general.....	11
1.1.1 Objetivos específicos	11
2. Recolección y análisis de datos de consumo.....	12
2.1 Determinación del consumo promedio diario	12
2.2 Curva de demanda y ajuste por eficiencia del sistema.....	13
2.3 Determinación del recurso solar.....	15
2.4 Cálculo de la potencia requerida del sistema.....	16
2.5 Dimensionamiento del campo fotovoltaico	17
2.6 Potencia instalada y nivel de compensación	18
2.7 Comparación técnica y económica de las tecnologías de inversores	18
y microinversores.....	18
2.7.1 Aplicación de inversores en el proyecto.....	19
2.7.2 Aplicación de microinversores en el proyecto	22
2.7.3 Factor de corrección, cálculos de regulación y pérdidas	25
2.7.4 Cálculo de Protecciones.....	28
2.7.5 Cálculo de las Canalizaciones.....	29
2.7.6 Análisis económico de las tecnologías.....	30
3. Diseño de un sistema fotovoltaico.....	32
Conclusiones	35
Recomendaciones	37
Referencias	38

Lista de figuras

Figura 1 Curva de la demanda.....	14
Figura 2 Irradiancia tomada de PVGIS.....	16
Figura 3 Equipo SUN2000-100KTL-M2.....	19
Figura 4 Curva de eficiencia del inversor	19
Figura 5 Especificaciones técnicas de los inversores.....	20
Figura 6 Equipo Hoymiles HMT-2000-4T-220	22
Figura 7 Especificaciones técnicas de los microinversores	23
Figura 8 Capacidad de corriente permisible en conductores aislados para 0 a 200 V nominales y 60 a 90 °C.	26
Figura 9 Sección total calibre conductores.....	29
Figura 10 Sección Total Canalizaciones	30
Figura 11 Retorno de la inversión final del proyecto.....	33
Figura 12 Evolución del valor presente acumulado	34

Lista de Apéndices

Los Apéndices se encuentran adjuntos en el repositorio del proyecto:

Apéndice A. Consumo mensual enero.

Apéndice B. Ficha técnica Panel.

Apéndice C. Ficha técnica Inversor.

Apéndice D. Ficha técnica Microinversor.

Apéndice E. Diseño en cubierta para Inversor.

Apéndice F. Diseño en cubierta para Microinversor.

Apéndice G. Cálculos de regulación y pérdidas para Inversor.

Apéndice H. Cálculos de regulación y pérdidas para Microinversor.

Apéndice I. Diagrama unifilar Inversor.

Apéndice J. Diagrama unifilar Microinversor.

Apéndice K. Cotización equipos.

Apéndice L. Presupuesto para Inversores.

Apéndice M. Presupuesto para Microinversores.

Resumen

Título: Diseño de un sistema fotovoltaico para la ladrillera Arcillas Santa Rosa comparando el impacto Técnico y económico del uso de inversores contra el uso de microinversores*

Autores: Jose Fernando Romero Fuentes, Brayan Yesid Quiñonez Sequeda **

Palabras Claves: Sistemas Fotovoltaicos, Autogeneración Industrial, Inversores y Microinversores, Análisis Tecnoeconómico, Eficiencia Energética, Retorno de Inversión (ROI).

Descripción:

El trabajo se presenta en el diseño de un sistema fotovoltaico para la compañía Ladrillera Arcillas Santa Rosa S.A.S., localizada en Nueva Granada, Magdalena, que tiene la finalidad de satisfacer su demanda energética a través de la energía solar para posteriormente comparar el transporte del rendimiento técnico entre dos tecnologías de conversión: inversores centralizados y mini inversores. La investigación parte del minucioso análisis del consumo energético de la fábrica, que llega a alcanzar un consumo promedio diario y que asciende a 1.329,00 kWh y apoyándose en herramientas como VATIA y PVGIS para poder determinar el recurso solar disponible (irradiancia promedio de 4,06 hsp). El sistema diseñado, el cual contaría con 600 módulos fotovoltaicos de 625 W, alcanza una potencia instalada de 375 kW, con la que se asegura que el sistema es capaz de satisfacer en un 100% la demanda eléctrica y generar un leve excedente (101,26%). Se comparan las tecnologías SUN2000-100KTL-M2 (Huawei) y Hoymiles HMT-2000-4T-220, evaluando la eficiencia, mantenimiento, las posibilidades de flexibilidad y los costos. Concluyendo, el estudio determina que ambas son viables, pero con importantes diferencias en cuanto a rendimiento y escalabilidad según las condiciones de operación industrial.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica de Telecomunicaciones, Director Mgtr. Rolando Andrés Rincón Saravia, Codirector PhD. Oscar Arnulfo Quiroga Quiroga

Abstract

Título: Design of a photovoltaic system for the Arcillas Santa Rosa brick factory comparing the technical and economic impact of using inverters versus using microinverters*

Authors: Jose Fernando Romero Fuentes, Brayan Yesid Quiñonez Sequeda**

Key Words: Photovoltaic Systems, Industrial Self-Generation, Inverters and Microinverters, Techno-Economic Analysis, Energy Efficiency, Return on Investment (ROI).

Description:

This study focuses on the design of a photovoltaic system for Ladrillera Arcillas Santa Rosa S.A.S., a company located in Nueva Granada, Magdalena, with the aim of meeting its energy needs through solar power and subsequently comparing the technical performance of two conversion technologies: centralized inverters and microinverters.

The research begins with a detailed analysis of the factory's energy consumption, which reaches an average daily consumption of 1,329.00 kWh, and relies on tools such as VATIA and PVGIS to determine the available solar resource (average irradiance of 4.06 hsp).

The designed system, which would consist of 600 625-W photovoltaic modules, achieves an installed capacity of 375 kW, ensuring that the system is capable of meeting 100% of the electricity demand and generating a slight surplus (101.26%).

The SUN2000-100KTL-M2 (Huawei) and Hoymiles HMT-2000-4T-220 technologies are compared, evaluating efficiency, maintenance, flexibility, and costs. In conclusion, the study determines that both are viable but with significant differences in terms of performance and scalability depending on industrial operating conditions.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica de Telecomunicaciones, Director Mgtr. Rolando Andrés Rincón Saravia, Codirector PhD. Oscar Arnulfo Quiroga Quiroga

Introducción

El aumento de la demanda de energía de los sectores productivos ha determinado que se tengan que aplicar soluciones que faciliten la optimización del consumo de energía y, al mismo tiempo, la disminución de los impactos provocados por el uso de fuentes convencionales. En este sentido, las energías renovables son cada vez más relevantes en el mundo, ya que son una opción para ayudar al desarrollo sostenible, a la mejora de la eficiencia energética y como medida para la reducción de las emisiones contaminantes. Entre estas energías tenemos la energía solar fotovoltaica, que destaca por ser una energía accesible, confiable y sencilla de adoptar en las variadas actividades industriales y comerciales.

La industria de las ladrilleras es una de las actividades productivas que requieren un importante consumo de energía para la producción de su actividad operativa. Por esta razón, la implementación de sistemas fotovoltaicos podría ser una posibilidad para conseguir una baja en la facturación relacionada con la energía, una mejora en la sostenibilidad del negocio y en parte, una utilización de los recursos renovables. Además, la viabilidad de este tipo de tecnologías no sólo lo generará un beneficio económico a medio y largo plazo, sino que irá en la línea de las políticas ambientales relacionadas con la transición energética y la lucha contra el cambio climático.

El presente trabajo desarrolla el análisis y el diseño del sistema fotovoltaico para una ladrillera considerando las condiciones energéticas, técnicas y operativas para su implementación. Para ello se realizará una evaluación de la demanda energética del sistema; una selección de componentes del sistema, un dimensionado de los equipos, así como la valoración de la alternativa más adecuada para garantizar un comportamiento eficiente. Por este motivo, se elabora una propuesta factible que tiende a mejorar el comportamiento energético de la empresa, disminuir su dependencia de los sistemas convencionales, y contribuir en el uso responsable de la energía utilizando tecnologías limpias y sostenibles.

1. Descripción del proyecto

El alto consumo de energía eléctrica es uno de los principales problemas que enfrentan las ladrilleras en Colombia. Estos gastos se deben al uso constante de maquinaria pesada y hornos de alta temperatura, lo que genera facturas elevadas cada mes. En el caso de la Ladrillera Arcillas Santa Rosa S.A.S., ubicada en Nueva Granada (Magdalena), el costo mensual por consumo de energía es considerablemente alto. Además, el uso de energía reactiva puede llevar a sanciones económicas adicionales por parte del proveedor del servicio eléctrico.

Esta situación afecta directamente la rentabilidad de la empresa y hace necesario buscar nuevas formas de reducir los costos. Una de las soluciones más viables es el uso de energía solar mediante un sistema fotovoltaico. Esta alternativa permite generar parte de la electricidad necesaria a partir del sol, lo que ayuda a disminuir la dependencia de la red eléctrica convencional. Sin embargo, para que la solución sea realmente eficiente y rentable, es muy importante elegir correctamente el tipo de tecnología que se usará para convertir la energía generada por los paneles solares. Existen dos opciones principales: inversores y microinversores. Cada una tiene ventajas y desventajas en términos de eficiencia, costos de instalación, mantenimiento y facilidad de expansión del sistema.

Por esta razón, el problema que se aborda en este proyecto no es solo el alto consumo energético, sino también la necesidad de comparar estas dos tecnologías para saber cuál es la más adecuada para las condiciones específicas de la empresa. El resultado de esta comparación permitirá diseñar una solución más eficiente, económica y sostenible. Es por eso que el presente proyecto abarca el diseño de un sistema fotovoltaico para la Ladrillera Arcillas Santa Rosa S.A.S., ubicada en el municipio de Nueva Granada, Magdalena. El diseño se enfoca en reducir significativamente el consumo de energía eléctrica proveniente de la red, mediante el aprovechamiento de la energía solar a través de la instalación de paneles solares en la superficie disponible de las cubiertas de la empresa.

El estudio contempla el análisis técnico y económico comparativo entre dos tecnologías de conversión: inversores y microinversores, evaluando variables como eficiencia energética, facilidad de mantenimiento, costos de instalación, escalabilidad del sistema y retorno de inversión.

El sistema fue dimensionado a partir del análisis del consumo energético de la empresa, el cual presenta un comportamiento variable con un consumo promedio diario de 1.329 kWh. Con base en esto, se definió una capacidad instalada de 375 kW, mediante la implementación de 600 módulos fotovoltaicos de 625 W y un sistema de conversión compuesto por tres inversores de 100 kW. El diseño contempla las condiciones del recurso solar de la zona, factores de eficiencia del sistema y pérdidas asociadas, garantizando una compensación energética estimada cercana al 100% de la demanda energética. Adicionalmente, se evaluaron alternativas tecnológicas de conversión, considerando criterios técnicos y económicos para la selección de la solución más adecuada. Este proyecto representa una alternativa viable desde el punto de vista técnico y económico, contribuyendo a la sostenibilidad energética y a la reducción de costos en el sector industrial.

1.1 Objetivo general

Diseñar un sistema fotovoltaico para la Ladrillera Arcillas Santa Rosa comparando el Impacto Técnico y Económico del uso de Inversores contra el uso de Microinversores.

1.1.1 Objetivos específicos

Analizar el perfil de consumo energético de la Ladrillera Arcillas Santa Rosa para determinar los requerimientos del sistema fotovoltaico.

Evaluar y comparar técnica y económicamente las tecnologías de inversores y microinversores, con base en configuraciones de diseño dimensionadas.

Diseñar la configuración eléctrica del sistema fotovoltaico utilizando la tecnología más viable, considerando criterios de eficiencia, costo y normativas aplicables.

2. Recolección y análisis de datos de consumo

Los datos de consumo eléctrico fueron obtenidos a partir de la plataforma VATIA, mediante registros históricos de la instalación.

Para el análisis, se seleccionó el mes de enero del 2026 como mes representativo, debido a que la ladrillera a finales del año 2025, realizó compensaciones de energía reactiva por lo cual son los datos más cercanos a la realidad y futuro de la ladrillera obtenidos en la hoja de cálculo, como se muestra en el **Apéndice A** permitiendo determinar los valores característicos de consumo:

- Consumo diario mínimo: 523 kWh
- Consumo diario máximo: > 2000 kWh
- Consumo promedio diario: 1.329,13 kWh

El consumo promedio diario se adopta como valor base para el dimensionamiento del sistema fotovoltaico.

A partir del análisis horario del consumo, se identifica:

- Existencia de carga base constante durante las 24 horas.
- Incremento progresivo de la demanda en horas diurnas.
- Máximos de consumo entre las 10:00 y 17:00 h, con valores superiores a 100 kWh.
- Disminución de la demanda en horario nocturno hasta valores cercanos a la carga base.

2.1 Determinación del consumo promedio diario

El consumo promedio diario se calculó a partir del consumo mensual registrado, permitiendo establecer una base energética para el dimensionamiento del sistema fotovoltaico. Este valor representa la demanda energética diaria promedio de la instalación y se adopta como parámetro fundamental para el diseño del sistema. Para su cálculo, se consideró el total de energía consumida durante el periodo de análisis y se dividió entre el número de días evaluados, obteniendo así un valor representativo del comportamiento energético de la empresa. Este

enfoque permite suavizar las variaciones diarias y proporciona una referencia más estable para la planificación del sistema. El valor obtenido fue:

$$E_{diario}=1.329,13 \text{ kWh/día}$$

Este resultado evidencia un nivel de consumo energético elevado, característico de procesos industriales continuos, y permite definir la capacidad requerida del sistema fotovoltaico para cubrir la demanda energética, así como estimar su desempeño y viabilidad técnica y económica.

Como criterio de trabajo, se seleccionó un mes representativo de operación y los datos fueron organizados en una hoja de cálculo con el fin de evaluar el comportamiento diario y horario del consumo. Esta metodología permitió pasar de una lectura general del consumo mensual a una comprensión más precisa de la demanda, identificando no solo la energía utilizada en el periodo analizado, sino también la manera en que dicha energía se distribuye a lo largo del día. El análisis de la información obtenida mostró una variabilidad importante entre jornadas, con registros diarios que oscilan entre valores cercanos a 523 kWh y otros superiores a 2000 kWh, lo cual evidencia que la operación de la ladrillera no es uniforme y que el uso de la energía responde a las dinámicas propias del proceso productivo. A pesar de esta variación, el análisis permitió establecer un consumo promedio diario de 1329,13 kWh/día, valor que se adoptó como referencia para el dimensionamiento energético del sistema fotovoltaico.

2.2 Curva de demanda y ajuste por eficiencia del sistema

Con los datos obtenidos, se construyó la curva de demanda eléctrica, con el fin de visualizar el comportamiento del consumo y sustentar el diseño del sistema. Posteriormente, se consideraron los valores de eficiencia con base en criterios de diseño y referencias técnicas reportadas en fichas de fabricantes y literatura especializada, considerando rangos típicos de operación en sistemas fotovoltaicos conectados a red. Asumiéndolos siguientes valores:

- Eficiencia en corriente alterna (AC): 0,99
- Eficiencia en corriente continua (DC): 0,99
- Eficiencia de inversores: 0,95

- Pérdidas por temperatura: 0,95

El factor de eficiencia total se calcula como:

$$\eta = \eta_{AC} \times \eta_{DC} \times \eta_{inv} \times \eta_{temp}$$

$$\eta = 0,99 \times 0,99 \times 0,95 \times 0,95 = 0,8845$$

Para compensar estas pérdidas, el consumo diario se ajusta de la siguiente manera:

$$E_{ajustado} = \frac{E_{diario}}{\eta}$$

$$E_{ajustado} = \frac{1.329,13}{0,8845} = 1.502,62 \text{ kWh/día}$$

Finalmente, el consumo mensual promedio es:

$$E_{mensual} = 1.502,62 \times 30 \approx 45.050 \text{ kWh/mes}$$

Figura 1

Curva de la demanda



El análisis horario permitió construir la curva de demanda diaria y así tener una visión clara del comportamiento operativo de la instalación. Se observó que durante la madrugada el consumo permanece relativamente estabilizado en valores medios, lo que evidencia la existencia de una carga base asociada a procesos que no se detienen por completo. Posteriormente, en las primeras horas de la mañana se presenta un incremento progresivo de la demanda, alcanzando sus niveles máximos entre el mediodía y las horas de la tarde, donde los picos de consumo superan los 100 kWh. Finalmente, en las horas de la noche el consumo disminuye y retorna a niveles próximos a la carga base. Esto nos permitió comprender como es la relación entre la demanda energética y los ciclos de trabajo de la ladrillera y tener un panorama claro de los requisitos del sistema.

2.3 Determinación del recurso solar

Una vez caracterizada la demanda, se procedió a determinar el recurso solar disponible en el sitio de instalación. Para ello se empleó la plataforma PVGIS, a partir de la cual se obtuvo la irradiación anual y se calcularon las horas sol pico, obteniendo así un valor de 4,06 HSP, el cual fue utilizado como parámetro de referencia para relacionar la necesidad energética de la ladrillera con la capacidad de generación esperada del sistema fotovoltaico. Este paso fue fundamental, ya que permitió articular dos variables centrales del diseño: por un lado, la demanda real de la instalación y, por otro, la disponibilidad efectiva del recurso solar en el lugar de emplazamiento. La radiación solar diaria promedio se determinó a partir del valor anual acumulado de irradiación, con el fin de obtener un parámetro representativo para el diseño del sistema fotovoltaico.

$$G_{anual}=1973,76 \text{ kWh/m}^2 \text{ –año}$$

La irradiación actual se tomó de la base de datos de PVGIS como se muestra en la figura 2

Figura 2

Irradiancia tomada de PVGIS

Entradas proporcionadas :	
Ubicación [Lat/Lon] :	9.831,-74.379
Horizonte :	Calculado
Base de datos utilizada :	PVGIS-ERA5
Tecnología fotovoltaica :	Silicio cristalino (original)
Fotovoltaica instalada [kWp]:	375000
Pérdida del sistema [%]:	14
Resultados de la simulación :	
Ángulo de inclinación [°]:	10
Ángulo de acimut [°]:	0
Producción anual de energía fotovoltaica [kWh]:	539839377.49
Irradiación anual en el plano [kWh/m ²]:	1973.76

A partir de este valor, se calculó la irradiación diaria promedio:

$$G_{diaria} = \frac{G_{anual}}{365}$$

$$G_{diaria} = \frac{1973.76}{365} = 5,41 \frac{kWh}{día}$$

Posteriormente, se aplicó un factor de ajuste de 0,75 considerando la Normativa Internacional IEC 61724 para condiciones no ideales:

$$HSP = 5,41 \times 0,75 = 4,06$$

2.4 Cálculo de la potencia requerida del sistema

Con base en el consumo promedio diario y en el recurso solar disponible, se estimó la potencia requerida del sistema. El resultado del dimensionamiento condujo a una necesidad cercana a 370 kW en DC de capacidad fotovoltaica. A partir de este valor, se realizó la búsqueda de los posibles paneles solares a utilizar, en donde se escogieron módulos de 625 W, y se calculó la cantidad de paneles necesarios para suplir la capacidad determinada, obteniendo aproximadamente 592 paneles. No obstante, en la etapa de diseño se decidió ajustar esta cantidad a 600 módulos, decisión que respondió a criterios de distribución física, simetría del arreglo, mejor organización eléctrica y mayor facilidad de implementación. Este ajuste permitió

consolidar una configuración más ordenada y funcional, sin alterar la lógica del dimensionamiento, y además aportó un margen de respaldo frente a variaciones de irradiancia, condiciones térmicas y degradación natural de los módulos a lo largo del tiempo.

La potencia del sistema fotovoltaico se determinó a partir del consumo diario ajustado y las horas sol pico (HSP), con el fin de estimar la capacidad necesaria para cubrir la demanda energética de la ladrillera.

La expresión utilizada es:

$$P = \frac{E_{diario}}{HPS}$$
$$P = \frac{1.502.62}{4,06} = 370 \text{ kW}$$

2.5 Dimensionamiento del campo fotovoltaico

Para determinar el número de módulos fotovoltaicos requeridos en un sistema solar, se parte de la potencia total que se desea generar y la potencia nominal de cada módulo. En este caso, se utilizan módulos de 625 W de potencia nominal. La cantidad de paneles necesarios se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$N = \frac{P}{P_{mod}}$$
$$N = \frac{370}{0,625} = 592 \text{ Modulos}$$

Para efectos de diseño, se realiza un ajuste del número de módulos con el fin de facilitar la configuración eléctrica y la distribución física del sistema, considerando:

- Configuración de strings e inversores
- Distribución en filas y disposición en cubierta
- Pérdidas por temperatura y orientación
- Condiciones operativas del sistema

Como resultado final de esta etapa, se definió un sistema de 600 módulos fotovoltaicos de 625 W cada uno, para una potencia instalada total de 375 kW. El estudio de producción asociado a esta configuración mostró un nivel de compensación del 101,26% teniendo en cuenta que la potencia a suplir es de 370 kW, lo que indica que el sistema propuesto no solo tiene la capacidad de compensar energéticamente la demanda eléctrica analizada, sino también de generar un leve excedente energético. Desde el punto de vista del proyecto, este resultado fue especialmente relevante porque permitió demostrar que la solución fotovoltaica no era simplemente una alternativa teórica, sino una propuesta con capacidad real de atender las necesidades energéticas de la ladrillera bajo condiciones de operación industrial. En consecuencia, el primer objetivo específico se dio por cumplido al establecer de forma clara y sustentada los requerimientos energéticos y de generación que servirían de base para la comparación de tecnologías y el diseño final del sistema.

2.6 Potencia instalada y nivel de compensación

La potencia total instalada del sistema se obtiene multiplicando el número de módulos fotovoltaicos por la potencia nominal de cada uno:

$$P_{instalada} = 600 \times 625 = 375.000 \text{ W} = 375 \text{ kW}$$

El nivel de compensación se define como:

$$\%Comp = \frac{E_{gen}}{E_{dem}} \times 100$$

Donde:

- E_{gen} : Energía generada por el sistema en el periodo de análisis
- E_{dem} : Energía demandada por la carga en el mismo periodo

$$\%Comp = \frac{E_{gen}}{E_{dem}} \times 100 = 101.26\%$$

2.7 Comparación técnica y económica de las tecnologías de inversores y microinversores

Una vez definidos los requerimientos energéticos del sistema, se continuó con el desarrollo de la comparación técnica y económica entre las dos tecnologías de conversión consideradas para el proyecto: inversores y microinversores. El propósito de esta etapa fue establecer cuál de las dos alternativas ofrecía mejores condiciones de implementación para la

Ladrillera Arcillas Santa Rosa, no solo en términos de desempeño eléctrico, sino también en aspectos de integración con la infraestructura existente, complejidad constructiva y costo total del proyecto. De acuerdo con lo planteado en el plan de trabajo, esta comparación debía realizarse con base en configuraciones ya dimensionadas, por lo que no se limitó a una revisión teórica de equipos, sino al desarrollo de dos soluciones técnicas completas sustentadas sobre la misma base de generación fotovoltaica.

2.7.1 Aplicación de inversores en el proyecto

En el caso de la tecnología con inversores, se seleccionaron tres inversores Huawei SUN2000-100KTL-M2 (figura 4) de 100 kW cada uno, logrando una capacidad total de conversión cercana a 300 kW en AC. La ficha técnica de este equipo muestra que se trata de un inversor trifásico diseñado para aplicaciones comerciales e industriales, con diez seguidores MPPT, capacidad de trabajar en un rango de salida de 400/480 V, tensión máxima de entrada de 1100 V y eficiencia máxima de hasta 98,8 % a 480 V, características que lo convierten en una alternativa adecuada para sistemas de gran escala, como se muestran en las figuras 5 y 6.

Figura 3

Equipo SUN2000-100KTL-M2



Figura 4

Curva de eficiencia del inversor

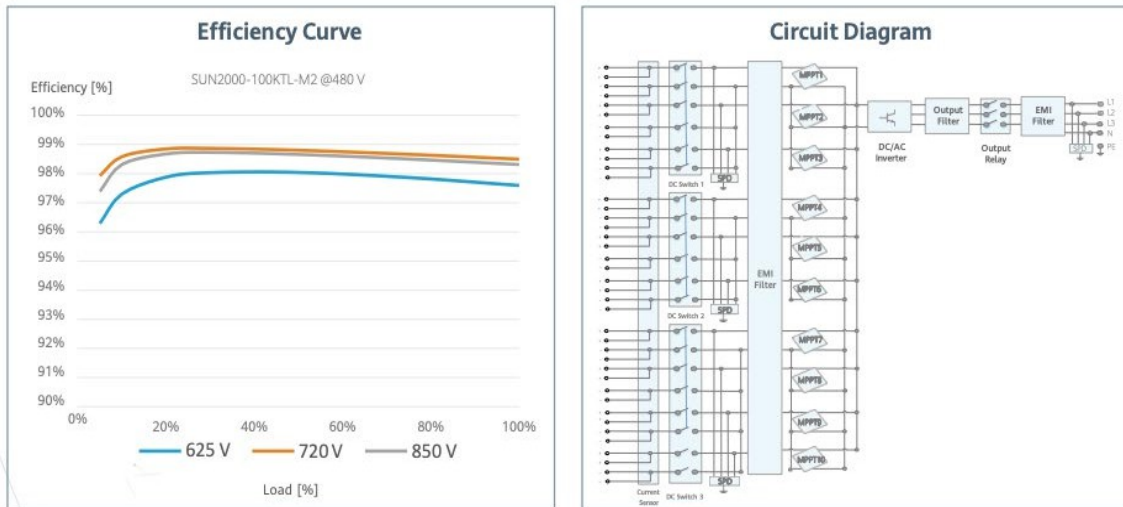


Figura 5

Especificaciones técnicas de los inversores

SUN2000-100KTL-M2
Technical Specification

Technical Specification		SUN2000-100KTL-M2
Efficiency		
Max. efficiency		98.6% @ 400 V, 98.8% @ 480 V
European efficiency		98.4% @ 400 V, 98.6% @ 480 V
Input		
Max. Input Voltage ¹		1,100 V
Max. Current per MPPT		30 A
Max. Current per Input		20 A
Max. Short Circuit Current per MPPT		40 A
Start Voltage		200 V
MPPT Operating Voltage Range ²		200 V ~ 1,000 V
Nominal Input Voltage		600 V @ 400 Vac, 720 V @ 480 Vac
Number of MPP trackers		10
Max. input number per MPP tracker		2
Output		
Nominal AC Active Power		100,000 W
Max. AC Apparent Power		110,000 VA
Max. AC Active Power (cosφ=1)		110,000 W
Nominal Output Voltage		400 V/ 480 V, 3W+(N)+PE
Rated AC Grid Frequency		50 Hz / 60 Hz
Nominal Output Current		144.4 A @ 400 V, 120.3 A @ 480 V
Max. Output Current		160.4 A @ 400 V, 133.7 A @ 480 V
Adjustable Power Factor Range		0.8 leading... 0.8 lagging
Max. Total Harmonic Distortion		< 3%

La configuración adoptada para esta alternativa consistió en distribuir los 600 módulos entre los tres inversores, asignando 200 paneles a cada uno. Aprovechando la disponibilidad de diez MPPT por inversor, se decidió configurar dos strings en paralelo por cada MPPT, con diez módulos en serie por string. Esta disposición permitió organizar veinte paneles por cada seguidor MPPT y establecer un arreglo coherente con las características técnicas del equipo. Desde el punto de vista eléctrico, cada módulo presenta un voltaje de circuito abierto cercano a 48,7 V; por tanto, cada string de diez módulos alcanza aproximadamente 487 V. A su vez, cada string entrega una corriente del orden de 16,15 A y, al conectar dos strings en paralelo por MPPT, la corriente combinada alcanza aproximadamente 32,3 A. Esta configuración fue adoptada después de revisar otras posibilidades de conexión y permitió mantener una operación técnicamente adecuada del sistema, con un equilibrio favorable entre tensión, corriente, seguridad operativa y facilidad de cableado, el diagrama unifilar se encuentra en el Apéndice I.

Desde el punto de vista de su integración con la infraestructura existente de la ladrillera, esta alternativa presentaba una ventaja importante. La red de operación de la planta trabaja a 440 V y el inversor Huawei seleccionado opera con tensión nominal de salida en el rango de 400 a 480 V trifásica, lo que permite una compatibilidad directa con el nivel de tensión del sistema eléctrico existente. En consecuencia, la solución con inversores no requería incorporar una etapa adicional de transformación de tensión para su conexión al sistema de la ladrillera, favoreciendo una integración más simple, directa y técnicamente conveniente.

En cuanto a la disposición física (Apéndice E.), los módulos asociados a la alternativa con inversores fueron organizados sobre la cubierta en arreglos tipo matriz, distribuidos por zonas y separados por corredores técnicos que facilitan las labores de operación y mantenimiento. Esta organización permitió conducir el cableado hacia el cuarto de máquinas de manera ordenada, reduciendo cruces innecesarios y mejorando la trazabilidad de las acometidas del sistema. De esta manera, la evaluación no solo consideró la lógica eléctrica del arreglo, sino también la forma en que la tecnología se adaptaba a la geometría de la cubierta y a la forma práctica de construir la instalación.

2.7.2 Aplicación de microinversores en el proyecto

Para el desarrollo del sistema fotovoltaico utilizando tecnología de microinversores, se seleccionaron equipos de la marca Hoymiles, específicamente el modelo de 2000 VA, el cual está diseñado para aplicaciones comerciales e industriales y permite la conexión de hasta cuatro módulos fotovoltaicos por unidad. El objetivo del sistema es alcanzar una potencia total instalada de aproximadamente 300 kW, por lo que se determinó la cantidad de microinversores necesarios a partir de la capacidad individual de cada equipo. En este caso, al utilizar microinversores de 2000 VA, se requieren 150 microinversores para cumplir con la potencia objetivo del sistema.

Figura 6

Equipo Hoymiles HMT-2000-4T-220



Ficha técnica del microinversor

HMT-1600-4T-208
HMT-1800-4T-208
HMT-2000-4T-208

Descripción

La nueva generación de microinversores Hoymiles de la serie HMT-2000-208 está diseñada para usarse con módulos fotovoltaicos de alta potencia, con una potencia de salida máxima de hasta 2000 VA y una corriente de entrada de CC máxima de hasta 16 A.

El innovador diseño de 4 entradas permite una instalación más rápida y a menor costo. Convierte a la serie HMS-2000-208 en una opción que ofrece una excelente relación entre costo y beneficio.

La nueva solución inalámbrica Sub-1G permite una comunicación más estable con el gateway DTU de Hoymiles. La plataforma inteligente S-Miles Cloud hace posible el monitoreo a nivel de módulo y el mantenimiento remoto.

Figura 7

*Especificaciones técnicas de los microinversores***Especificaciones técnicas**

Modelo	HMT-1600-4T-208	HMT-1800-4T-208	HMT-2000-4T-208			
Datos de entrada (CC)						
Módulo de potencia de uso común (W)	320 a 540+		360 a 600+		400 a 670+	
Voltaje de entrada máximo (V)	65					
Intervalo de voltaje de MPPT (V)	16-60					
Voltaje de arranque máximo/mínimo (V)	22/60					
Rango de voltaje pico de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT)	31 a 48	32 a 48		33 a 48		
Corriente de entrada máxima (A)	4 × 14	4 × 15		4 × 16		
Corriente máxima de cortocircuito de entrada (A)	4 × 25					
Cantidad de MPPT	2					
Cantidad de entradas por MPPT	2					
Datos de salida (CA)						
Conexión a la red eléctrica	127/220, 120/208, 3Φ/PE/N/(Neutro Opcional)					
Máxima potencia de salida continua (VA)	1600		1800		2000	
Corriente de salida máxima continua (A)	4,21	4,44	4,73	5,00	5,26	5,56
Voltaje nominal de salida (V)	220	208	220	208	220	208
Rango de voltaje nominal de salida (V) ¹	180-270					
Frecuencia nominal/intervalo (Hz)	60/55-65					
Factor de potencia (ajustable)	> 0,99 predeterminado 0,85 adelantado ... 0,85 atrasado					
Distorsión armónica total	< 3%					
Unidades máximas por ramal de calibre AWG 10 ²	7	6	6	6	5	5
Unidades máximas por ramal de calibre AWG 12 ²	4	4	4	4	3	3

Cada microinversor cuenta con un diseño tipo “4 en 1”, lo que significa que puede conectarse directamente a cuatro paneles solares, permitiendo una conversión de energía independiente a nivel de pequeño grupo de módulos. De esta forma, los 600 paneles del sistema quedan distribuidos uniformemente entre los 150 microinversores. Un aspecto importante del diseño es la forma en que se agrupan y conectan los microinversores hacia la red como se muestra en **el Apéndice J**. Para optimizar la instalación y reducir la cantidad de acometidas eléctricas, se utilizan accesorios del fabricante que permiten agrupar varios microinversores en un solo circuito.

Se decidió organizar los microinversores en grupos de cuatro unidades gracias a los accesorios que tiene esta referencia, de tal manera que cada grupo comparte una única acometida hacia el tablero general de protecciones (TGA). Esta estrategia permite simplificar el cableado, reducir costos de instalación y mejorar la organización del sistema. Al realizar la distribución, ver **Apéndice F**

$$150 \text{ microinversores} \div 4 = 37,5 \text{ grupos}$$

Dado que no es posible tener fracciones de grupo, se definió la siguiente configuración:

- 37 grupos de 4 microinversores
- 1 grupo adicional de 2 microinversores

Todos los microinversores mantienen la conexión de cuatro paneles cada uno, asegurando una distribución homogénea del sistema. Cada uno de estos grupos se conecta hacia el sistema de recolección de energía y se lleva hasta el cuarto eléctrico o cuarto de máquinas, donde se realiza la integración con la red de la instalación. Este tipo de configuración presenta varias ventajas importantes:

- Conversión de energía más distribuida y modular
- Menor impacto ante fallas (si un microinversor falla, solo afecta a pocos paneles)
- Mejor desempeño ante sombras parciales
- Mayor facilidad de monitoreo individual por módulo.

En cuanto a la compatibilidad con la infraestructura existente de la ladrillera, esta alternativa presentó una condición menos favorable. La ficha técnica de los microinversores seleccionados establece tensiones nominales de salida de 220 V o 208 V, y para el desarrollo del proyecto se adoptó la configuración de 220 V. No obstante, dado que la red de operación de la ladrillera trabaja a 440 V, la integración de esta solución requería incorporar un transformador baja-baja que permitiera elevar la tensión del sistema fotovoltaico desde 220 V hasta 440 V. Este requerimiento añadía un elemento adicional de interfaz entre la generación fotovoltaica y la red existente, incrementando la complejidad técnica de la instalación, el número de equipos involucrados y el costo global de la alternativa con microinversores.

El análisis mostró que ambas alternativas son técnicamente viables, aunque con implicaciones distintas en la instalación eléctrica. En el caso de los inversores, la arquitectura centralizada permitió un sistema de cableado más concentrado y una integración más directa con el cuarto de máquinas y con la red existente de la ladrillera. Por el contrario, la alternativa con microinversores implicó una distribución más extensa de acometidas en corriente alterna, la necesidad de revisar con mayor detalle varios trayectos largos y, adicionalmente, la incorporación del transformador baja-baja para adecuar la tensión de salida a los 440 V requeridos por la planta. Esta última condición resultó especialmente relevante, ya que introdujo una diferencia técnica clara entre ambas opciones en términos de compatibilidad con la infraestructura existente.

2.7.3 Factor de corrección, cálculos de regulación y pérdidas

Para la selección del calibre de los conductores, se utilizaron la estructura de capacidad de conducción de corriente (figura 8), en la cual se establece la ampacidad de los cables en función de su sección transversal y del tipo de material. A partir de esto, se identificó el calibre adecuado que permite soportar la corriente de operación del sistema sin exceder los límites establecidos. No obstante, debido a que la temperatura ambiente del sitio de instalación se encuentra entre 31 °C y 34 °C, es necesario aplicar un factor de corrección de 0,91 a la capacidad de corriente de los conductores, según lo indicado en la parte inferior de la tabla. Este ajuste reduce la ampacidad nominal del cable, garantizando que la selección final cumpla condiciones reales de operación. Con el calibre definido y corregido, se procede al análisis de la regulación de voltaje del sistema.

Figura 8

Capacidad de corriente permisible en conductores aislados para 0 a 200 V nominales y 60 a 90 °C.

Sección transv.	Temperatura nominal del conductor (ver Tabla 310-13)						Calibre
	60 °C	75 °C	90 °C	60 °C	75 °C	90 °C	
	TIPOS TW*, UF*	TIPOS FEPW*, RH*, RHW*, THHW*, THW*, THWN*, XHHW*, USE*, ZW*	TIPOS TBS,SA,SS,FEP*, FEPB*,MLRHH*, RHW-2, THHN*, THHW*,THW-2*, THWN-2*, USE-2, XHH, XHHW*, XHHW-2, ZW-2	TIPOS TW*, UF*	TIPOS RH*, RHW*, THHW*, THW*, THWN*, XHHW*, USE*	TIPOS TBS,SA,SS, THHN*, THHW*, THW-2, THWN-2, RHH*, RHW-2, USE-2, XHH, XHHW, XHHW-2, ZW-2	
mm²	COBRE			ALUMINIO 0 ALUMINIO RECUBIERTO DE COBRE			AWG o kcmils
0,82	--	--	14	--	--	--	18
1,31	--	--	18	--	--	--	16
2,08	20*	20*	25	--	--	--	14
3,30	25*	25*	30*	20*	20*	25*	12
5,25	30	35*	40*	25	30*	35*	10
8,36	40	50	55	30	40	45	8
13,29	55	65	75	40	50	60	6
21,14	70	85	95	55	65	75	4
26,66	85	100	110	65	75	85	3
33,62	95	115	130	75	90	100	2
42,20	110	130	150	85	100	115	1
53,50	125	150	170	100	120	135	1/0
67,44	145	175	195	115	135	150	2/0
85,02	165	200	225	130	155	175	3/0
107,21	195	230	260	150	180	205	4/0
126,67	215	255	290	170	205	230	250
152,01	240	285	320	190	230	255	300
177,34	260	310	350	210	250	280	350
202,68	280	335	380	225	270	305	400
253,35	320	380	430	260	310	350	500
304,02	355	420	475	285	340	385	600
354,69	385	460	520	310	375	420	700
380,02	400	475	535	320	385	435	750
405,36	410	490	555	330	395	450	800
456,03	435	520	585	355	425	480	900
506,70	455	545	615	375	445	500	1.000
633,38	495	590	665	405	485	545	1.250
760,05	520	625	705	435	520	585	1.500
886,73	545	650	735	455	545	615	1.750
1.013,40	560	665	750	470	560	630	2.000
FACTORES DE CORRECCIÓN							
Temp. ambiente en °C	Para temperaturas ambientes distintas de 30°C, multiplicar las anteriores corrientes por el correspondiente factor de los siguientes						Temp. ambiente en °C
21-25	1,08	1,05	1,04	1,08	1,05	1,04	21-25
26-30	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	26-30
31-35	0,91	0,94	0,96	0,91	0,94	0,96	31-35
36-40	0,82	0,88	0,91	0,82	0,88	0,91	3640
41-45	0,71	0,82	0,87	0,71	0,82	0,87	41-45
46-50	0,58	0,75	0,82	0,58	0,75	0,82	46-50
51-55	0,41	0,67	0,76	0,41	0,67	0,76	51-55
56-60		0,58	0,71		0,58	0,71	56-60
61-70		0,33	0,58		0,33	0,58	61-70
71-80			0,41			0,41	71-80

A continuación, se llevan a cabo los cálculos adecuados a la regulación del sistema de distribución del sistema eléctrico en corriente alterna (AC) y en corriente directa (DC) para garantizar que los conductores estén bien dimensionados y que el sistema fotovoltaico funcione en condiciones seguras y eficientes.

Este procedimiento asegura que los conductores seleccionados cumplen tanto con la capacidad de corriente como con los requisitos de desempeño eléctrico del sistema.

A continuación, se muestran las fórmulas para hallar la regulación parcial, regulación acumulada y pérdidas de potencia parcial.

Para corriente alterna:

$$\text{Regulación parcial} = \text{momento KVA} \times FC \text{ red} \times K \text{ conductor}$$

Donde;

$$\text{momento KVA} = \text{Longitud (m)} \times \text{KVA(15 años)}$$

$$FC \text{ red} = \text{Factor de corrección de la red}$$

$$k \text{ conductor} = \frac{KG \text{ COND}}{(\text{Tensión de diseño})^2}$$

$$\text{Tensión de diseño} = \text{Tensión en la cual esta diseñado el sistema [400 V]}$$

$$\text{Regulación acumulada} = \text{Regulación parcial} + \text{Regulación parcial del tramo anterior}$$

$$\text{Pérdidas de potencia parcial(\%)} = \frac{R \text{ COND} \times FC \text{ red} \times \text{momento (KVA)} \times 100}{\text{Tensión de diseño}^2 \times FP}$$

Para corriente continua:

$$\text{Regulación parcial} = \frac{2 \times I \times R \text{ COND} \times \left(\frac{\text{Longitud}}{1000}\right) \times 100}{\text{Voltage del string}}$$

Donde;

$$I = \text{Corriente (15 años)[A]}$$

$$R \text{ COND} = \text{Resistencia del conductor} \left[\frac{\text{ohm}}{\text{km}}\right]$$

Voltage del string = voltage en la cual estan la cadena de paneles

$$\text{Perdidas de potencia parcial(\%)} = \frac{(R \text{ COND} \times \left(\frac{\text{Longitud}}{1000}\right) \times I^2) \times 100}{\text{Potencia de diseño}[W]}$$

No obstante, es importante aclarar que los cálculos de los conductores se muestran en el Apéndice G y Apéndice H.

2.7.4 Cálculo de Protecciones

La selección de las protecciones del sistema fotovoltaico se realizó con base en la corriente que circula por cada trayecto y en el nivel de tensión presente en cada punto de la instalación. Es decir, para cada ramificación primero se identificó la corriente de diseño y luego, con ese valor y con la tensión del circuito, se escogió la protección adecuada.

En la alternativa con inversores, la selección se hizo tanto en corriente continua como en corriente alterna. En el lado DC se consideraron las corrientes de los strings y de cada agrupación asociada a los MPPT, mientras que en el lado AC se escogieron las protecciones de salida de cada inversor y la protección general o totalizador, de acuerdo con la corriente de operación y la tensión de la red de la planta. Además, el inversor Huawei seleccionado ya incorpora varias funciones internas de protección, por lo que las protecciones externas se definieron como complemento para garantizar la seguridad del sistema.

En la alternativa con microinversores, como la conversión se realiza directamente en cada equipo, no se plantearon protecciones externas en DC, sino únicamente en AC. En este caso se seleccionaron las protecciones para los grupos de microinversores, los alimentadores y el punto de acople con el transformador y la red existente, teniendo siempre en cuenta la corriente de cada tramo y la tensión de operación correspondiente. Así, en ambas alternativas, las protecciones se eligieron de forma coherente con las condiciones reales de funcionamiento del sistema.

2.7.5 Cálculo de las Canalizaciones

Para el dimensionamiento de las canalizaciones del sistema, se identificó en cada trayecto el calibre de los conductores instalados. A partir de esta información, se obtuvo la sección aproximada de cada cable utilizando la tabla correspondiente (ver Figura 9), la cual proporciona el área en mm² según el calibre. Posteriormente, se sumaron las áreas de todos los conductores presentes en cada canalización, con el fin de determinar la ocupación total del ducto.

Figura 9

Sección total calibre conductores

Tipos: AF, RHH*, RHW*, RHW-2*, RHHN, RHHW, THW, THW-2, TFN, TFFN, THWN, THWN-2, XF, XFF				
Tipo	Calibre AWG o kcmil	Seca Transv. cond. (mm ²)	Diámetro aprox. (mm)	Sección aprox. total (mm ²)
RHH*, RHW*, RHW-2* THH, THW, AF, XF, XFF	12	3,30	4,6	16,8
	10	5,25	5,2	21,5
	8	8,36	6,8	35,9
TW, THW THHW THW-2 RHH* RHW* RHW-2*	6	13,29	7,7	46,8
	4	21,14	6,9	62,8
	3	26,66	9,7	73,2
	2	33,62	10,5	86
	1	42,2	12,5	122,6
	1/0	53,50	13,5	143,4
	2/0	67,44	14,7	169,3
	3/0	85,02	16,0	201,1
	4/0	107,21	17,5	239,9
	250	126,67	19,4	296,5
	300	152,01	20,3	340,7
	350	177,34	22,1	384,4
	400	202,68	23,3	427,0
	500	253,35	25,5	509,7
	600	304,02	28,3	627,7
	700	354,69	30,1	710,3
	750	380,02	30,9	751,7
	800	405,36	31,8	791,7
	900	456,03	33,4	874,9
	1000	506,70	34,8	953,8
1250	633,38	39,1	1200,1	
1500	760,05	42,2	1399,7	
1750	886,73	45,1	1598,3	
2000	1013,40	47,8	1794,7	
TFN	18	0,82	2,1	3,6
TFFN	16	1,31	2,4	4,7
THHN THWN THWN-2	14	2,08	2,8	6,3
	12	3,30	3,3	8,6
	10	5,25	4,2	13,6
	8	8,36	5,5	23,6
	6	13,29	5,5	32,7
	4	21,14	8,2	53,2
	3	26,66	3,9	62,8
	2	33,62	9,8	74,7
	1	42,2	11,3	100,8
	1/0	53,50	12,3	119,7
	2/0	67,44	13,5	143,4
	3/0	85,02	14,8	172,8
	4/0	107,21	16,3	208,8
	250	126,67	18,1	256,1
	300	152,01	19,5	297,3

Siguiendo la normativa aplicable, Se adoptó un criterio conservador del 60% de

ocupación respecto al área total de la canalización, en concordancia con los límites máximos establecidos por el NEC, dejando un 40% de espacio libre para facilitar la disipación térmica y asegurar condiciones adecuadas de instalación. Con este criterio, se determinó el área mínima requerida de la canalización y se procedió a seleccionar el tamaño comercial de la tubería utilizando la tabla de capacidad de canalizaciones (ver Figura 10), tomando como referencia la sección total al 100% y eligiendo un valor igual o superior al calculado.

Figura 10

Sección Total Canalizaciones

Tamaño comercial		Tuberías eléctricas metálicas (EMT)					Tuberías eléctricas no metálicas				
pulgadas	mm	Diámetro interior, mm	Sección total 100%, mm ²	Dos hilos, 31%, mm ²	Más de dos hilos, 40%, mm ²	Un hilo, 53%, mm ²	Diámetro interior, mm	Sección total 100%, mm ²	Dos hilos, 31%, mm ²	Más de dos hilos, 40%, mm ²	Un hilo, 53%, mm ²
1/2	16	15,80	196,1	60,85	78,71	103,87	14,22	158,71	49,03	63,87	84,52
3/4	21	20,93	343,9	106,45	137,42	182,58	19,30	292,9	90,96	116,77	154,84
1	27	26,64	557,4	172,90	223,23	296,48	25,40	506,45	156,77	202,58	268,39
1 1/4	35	35,05	965,2	299,35	385,81	511,61	34,04	909,68	281,93	363,87	481,93
1 1/2	41	40,89	1 313,6	407,1	525,16	696,13	39,88	1249,03	387,1	499,35	661,93
2	53	52,50	2165,2	670,97	865,80	1 147,09	51,31	2067,74	641,29	827,1	1096,13
2 1/2	63	63,37	3779,3	1 171,61	1511,61	2008,22	—	—	—	—	—
3	78	85,24	5 707,1	1 123,87	2282,58	3024,51	—	—	—	—	—
3 1/2	91	97,38	7 448,4	2309,03	2979,35	3947,73	—	—	—	—	—
4	104	110,08	9518,0	1 014,84	3807,09	5044,51	—	—	—	—	—
Tamaño comercial		Tubo conduit metálico flexible					Tubo conduit metálico intermedio (IMC)				
pulgadas	mm	Diámetro interior, mm	Sección total 100%, mm ²	Dos hilos, 31%, mm ²	Más de dos hilos, 40%, mm ²	Un hilo, 53%, mm ²	Diámetro interior, mm	Sección total 100%, mm ²	Dos hilos, 31%, mm ²	Más de dos hilos, 40%, mm ²	Un hilo, 53%, mm ²
3/8	10	9,75	74,84	23,23	29,68	39,36	—	—	—	—	—
1/2	16	16,13	204,52	63,23	81,94	108,39	16,76	220,64	68,39	88,39	116,77
3/4	21	20,93	343,87	106,45	137,42	181,94	21,95	378,06	117,42	151,61	200,64
1	27	25,91	527,1	163,23	210,97	279,35	28,07	618,71	191,61	247,74	327,74
1 1/4	35	32,39	823,87	255,48	329,68	436,77	36,78	1 061,93	329,03	424,52	562,58
1 1/2	41	39,07	1198,06	371,61	479,35	634,84	42,75	1 434,19	444,52	573,55	758,00
2	53	51,82	2109,03	653,55	843,22	1117,42	54,61	2341,29	725,81	936,77	1 240,64
2 1/2	63	63,50	3167,09	981,93	1267,09	1 678,71	64,95	3312,90	1 027,09	1325,16	1 756,13
3	78	76,20	4 560,64	1 413,55	1 823,87	2416,77	80,67	5110,96	1594,51	2 044,51	2709,03
3 3/2	91	88,90	6207,08	1 924,51	2482,58	3286,8	93,24	6828,37	2116,77	2731,61	3619,35
4	103	101,6	8107,08	2 513,54	3243,22	4296,77	105,8,2	8794,18	2 726,45	3517,41	4660,64

Finalmente, se definió el tipo de canalización según la ubicación de la instalación: para los tramos en exteriores se utilizó tubo conduit metálico flexible, debido a su mayor adaptabilidad y resistencia a condiciones ambientales, mientras que en interiores se emplearon tuberías eléctricas metálicas tipo EMT, por su facilidad de instalación y adecuado desempeño en ambientes controlados

2.7.6 Análisis económico de las tecnologías

La presente sección contiene el análisis económico del proyecto, que se basa en la elaboración de los presupuestos de cada una de las distintas tecnologías presentadas. Dicho análisis permite comparar los diferentes costes que presenta cada una de las alternativas y determinar su conveniencia, con el objetivo de conocer cuál de las alternativas es la más ventajosa para el proyecto desde el punto de vista económico.

El presupuesto que se presenta en el **Apéndice L** indica que la mayor proporción de la inversión corresponde a los módulos fotovoltaicos, que suponen una cantidad aproximada de \$191.250.000, seguido por los inversores de \$57.300.000, así como el cableado eléctrico donde, especialmente el conductor AWG No 10, representa un coste importante debido a la gran dimensión del sistema. Los elementos estructurales como rieles, soportes, bandejas portacables presentan un peso importante en la suma del coste. Por su parte, en los dispositivos de protección señalamos un coste moderado, pero desempeñan un rol básico en la seguridad del sistema. El precio se eleva hasta la suma de \$1.168.256.715,00, lo que representan unas inversiones que van en línea de acuerdo a un sistema fotovoltaico de características industriales, ofreciendo su eficiencia, seguridad y fiabilidad en el funcionamiento del mismo. Por otro lado, se presenta el presupuesto correspondiente a la tecnología de microinversores, en el cual se detallan los equipos, materiales y componentes requeridos para la implementación del sistema fotovoltaico. Este análisis permite identificar la distribución de los costos y evaluar la inversión necesaria bajo esta configuración tecnológica.

El presupuesto que se presenta en el **Apéndice M** pone en evidencia que los mayores costos recaen sobre los módulos fotovoltaicos, con un valor cercano a los \$191.250.000, y sobre los microinversores Hoymiles HMT2000-4T-220, cuyo valor se aproxima a los \$193.500.000, siendo este último el componente con mayor peso dentro de esta tecnología. El cableado eléctrico también tiene una participación destacable dentro del costo total, en particular el conductor AWG No. 6 representa un costo aproximado de \$100.404.400, reflejando la complejidad del sistema distribuido, además de incluirse soportes de esta tecnología, como los conectores, las unidades de comunicación (DTU) así como sus accesorios, aumentando, a su vez, el costo del sistema en su conjunto. Los elementos estructurales como rieles, soportes o fijaciones continúan teniendo un peso relevante, más bien como la propia tecnología de inversores, garantizando una adecuada instalación, mientras que los dispositivos de protección tienen costos moderados, pero son un elemento importante dentro de la seguridad del sistema. El costo total se sitúa en \$1.308.407.273, cifra que implica un costo mayor al de la tecnología de inversores.

3. Diseño de un sistema fotovoltaico

Como resultado del análisis técnico y económico que se desarrolló a lo largo de los capítulos anteriores, se determinó finalmente el diseño del sistema fotovoltaico para la Ladrillera Arcillas Santa Rosa S.A.S., adoptando como alternativa más adecuada la tecnología de inversores tipo string, más concretamente el inversor Huawei SUN2000-100KTL-M2.

El sistema fue dimensionado con una potencia instalada de unos 375 kW, gracias a la utilización de 600 módulos fotovoltaicos de 625 W por módulo, distribuidos en tres inversores de 100 kW de potencia. Su configuración eléctrica fue obtenida mediante un diseño que incorpora strings conectados a múltiples seguidores MPPT, lo que resulta en una mayor optimización en la captación de la radiación solar y a la vez permitir una buena adaptación a las condiciones del sistema.

La elección de esta tecnología se basa en varios criterios técnicos; en primer lugar, porque los inversores alcanzan altos niveles de eficiencia de conversión (en torno al 98,8%), lo que representa un claro beneficio en el aprovechamiento de la energía generada y, en segundo lugar, ya que la arquitectura centralizada permite manejar potencias grandes con una menor complejidad en la instalación eléctrica, lo que resulta ventajoso para aplicaciones industriales como la que ha motivado el presente proyecto.

Respecto al diseño eléctrico, la configuración adoptada ha permitido mantener niveles adecuados de tensión y corriente en los strings, sin trabajar sobre límites proximales de valores máximos del inversor. Esto se traduce en una operación más segura, menos pérdida eléctrica y mejores condiciones del cableado y protecciones. Por otra, los análisis de regulación de tensión en corriente continua y alterna demuestran que el sistema opera dentro de los límites establecidos, lo que garantiza estabilidad en su operación. En cuanto a la disposición física del sistema, los módulos han sido configurados en forma de matriz sobre la cubierta, agrupados por inversor y separados por corredores técnicos, lo que propicia las labores de mantenimiento y operación. Esta sectorización ha permitido que se pueda intervenir en cada subsistema localizada sin afectar la instalación en su integralidad.

Por último, el análisis económico demuestra que la tecnología de inversores ofrece una inversión total inferior a la del microinversor, con una diferencia global en el presupuesto del proyecto. Mientras que la solución con los inversores llega a un valor cercano a los \$1.170 millones, la alternativa con microinversores de \$1.310 millones, valor que se debe a la mayor cantidad de equipos a utilizar y a la complejidad de la instalación distribuida.

Aunque la tecnología de microinversores permite facilitar situaciones de flexibilidad y mejor comportamiento en condiciones no óptimas de tipo sombras parciales, tal y como se manifiestan, no son un aspecto determinante en el marco de este proyecto, debido a que la cubierta disponible presenta condiciones de irradiación y orientación relativamente homogéneas, motivo por el cual los beneficios añadidos en esta tecnología no llegan a compensar el aumento del coste de la inversión.

Por consiguiente, la elección de inversores como tecnología principal abre una respuesta adecuada entre eficiencia, viabilidad económica, sencillez constructiva y simplicidad de mantenimiento, lo que la hace la opción más conveniente bajo los supuestos considerados de la Ladrillera Arcillas Santa Rosa S.A.S.

Así pues, se presenta el retorno de la inversión en la figura 11:

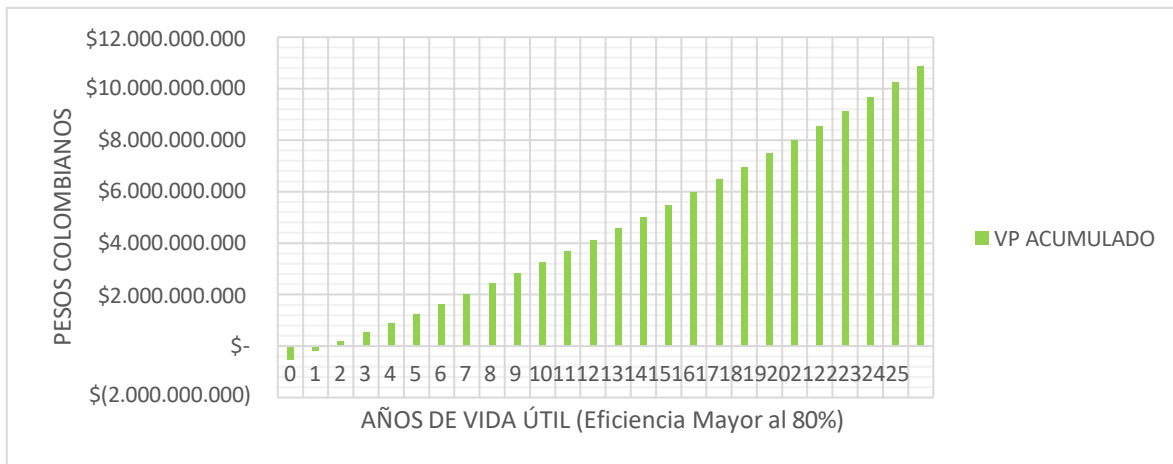
Figura 11

Retorno de la inversión final del proyecto

VALOR DEL PROYECTO SOLAR	\$ 1.168.256.715
COSTO kW/h (Año 0)	\$ 643,60
CONSUMO ANUAL PROMEDIO kW/h - (Año 0)	540.943
INCREMENTO ANUAL DEL kW/h	3,0%
TASA DE INTERÉS O DESCUENTO ANUAL	4,0%

INGRESOS BRUTOS	\$ 12.693.332.773
GANANCIA NETA	\$ 11.525.076.058
AHORRO ANUAL PROM	\$ 507.733.311

PERIODO DE RETORNO DE INVERSIÓN (AÑOS)	3,519
--	-------

Figura 12*Evolución del valor presente acumulado*

La figura 12 muestra la evolución del valor presente acumulado (VP acumulado) del proyecto fotovoltaico a lo largo de su vida útil, considerando un horizonte de aproximadamente 25 años y una eficiencia operativa superior al 80%. En los primeros años se observa un comportamiento negativo del VP acumulado, lo cual corresponde al impacto de la inversión inicial requerida para la implementación del sistema. Este resultado es esperado en proyectos de este tipo, donde el capital de inversión se recupera progresivamente mediante los ahorros generados en el consumo de energía eléctrica.

A partir de los años siguientes, la curva muestra un crecimiento sostenido y aproximadamente lineal del VP acumulado, evidenciando que los beneficios económicos anuales superan los costos operativos del sistema. Este comportamiento refleja la estabilidad en la generación de ahorros, producto de la reducción en la compra de energía a la red. Se identifica un punto de equilibrio (payback) en los primeros años de operación, momento en el cual el VP acumulado pasa de valores negativos a positivos. A partir de este punto, el proyecto comienza a generar beneficios económicos netos para la empresa. Hacia el final del periodo analizado (año 25), el VP acumulado alcanza valores cercanos a los 11.000 millones de pesos, lo que evidencia una alta rentabilidad del sistema fotovoltaico a lo largo de su vida útil. Este resultado demuestra que la inversión no solo se recupera, sino que genera un retorno significativo, consolidándose como una alternativa económicamente viable.

Conclusiones

El desarrollo del proyecto permitió cumplir el propósito de analizar el comportamiento energético de la Ladrillera Arcillas Santa Rosa y traducirlo en requerimientos concretos de diseño para un sistema fotovoltaico. A partir de la información obtenida desde la plataforma VATIA se identificó que la demanda de la empresa no es uniforme, sino que presenta una carga base permanente y picos de consumo concentrados en las horas de mayor actividad operativa, con un consumo promedio diario de 1329,13 kWh/día. Este comportamiento confirmó que el diseño del sistema debía responder a una demanda industrial continua y no a un patrón de consumo intermitente, por lo que el análisis del perfil de carga resultó determinante para sustentar técnicamente el dimensionamiento del proyecto.

Con base en el análisis de la demanda y en la estimación del recurso solar disponible en el sitio, se estableció que la implementación de un sistema fotovoltaico de 375 kW, conformado por 600 módulos de 625 W, es técnicamente viable para atender la necesidad energética evaluada en la ladrillera. El balance estimado indica una compensación del 101,26 % en el periodo analizado, aportando un pequeño margen de respaldo frente a variaciones de irradiancia, condiciones térmicas y degradación natural de los módulos. En este sentido, el proyecto demuestra que la autogeneración fotovoltaica constituye una alternativa real para reducir la dependencia de la red eléctrica en aplicaciones industriales con altos consumos energéticos.

La comparación entre las tecnologías de inversores y microinversores mostró que ambas alternativas son funcionalmente viables, pero no equivalentes desde el punto de vista técnico y económico. Aunque la solución con microinversores ofrecía ventajas en modularidad y flexibilidad operativa, la alternativa con inversores resultó más conveniente para este caso de estudio, debido a su menor costo total de implementación, a la mayor simplicidad de su arquitectura eléctrica y, especialmente, a su compatibilidad directa con la red existente de 440 V de la ladrillera. Por el contrario, la opción con microinversores requería una etapa adicional de transformación de tensión desde 220 V hasta 440 V, lo que incrementaba la complejidad del sistema y la inversión global del proyecto. En consecuencia, la selección final de la tecnología de inversores no se sustentó únicamente en criterios económicos, sino en una evaluación integral de desempeño, integración y aplicabilidad.

La tecnología de inversores se consolidó como la alternativa más conveniente para el proyecto, al combinar viabilidad técnica, compatibilidad con la red existente y una mejor relación costo-beneficio frente a la solución con microinversores. Además, el análisis financiero evidenció un retorno estimado de la inversión cercano a 3,5 años, resultado que resalta la conveniencia económica del sistema fotovoltaico propuesto. Esto demuestra que, aunque la implementación requiere una inversión inicial significativa, la magnitud de los ahorros esperados permite proyectar una recuperación rápida del capital y refuerza la factibilidad integral de la solución adoptada.

Finalmente, una de las principales aportaciones del proyecto al campo de la ingeniería eléctrica radica en demostrar que el diseño de sistemas fotovoltaicos en entornos industriales debe abordarse desde una perspectiva integral, en la que no basta con comparar eficiencias nominales de los equipos de conversión. El estudio evidenció que variables como el perfil de consumo, la compatibilidad con la infraestructura existente, la configuración del cableado, la necesidad de equipos adicionales y el costo global de implementación son determinantes en la selección de la tecnología más adecuada. En ese sentido, el proyecto no solo entrega una solución técnicamente estructurada para la Ladrillera Arcillas Santa Rosa, sino que también aporta un criterio de análisis aplicable a otros proyectos fotovoltaicos de escala industrial con condiciones similares.

Recomendaciones

Como continuidad natural de este trabajo, se recomienda que, en caso de que la empresa decida avanzar hacia la implementación del sistema fotovoltaico, se realice una verificación final en campo de las condiciones constructivas y operativas de la instalación. Esta etapa permitiría ajustar aspectos asociados a la disposición definitiva de los módulos sobre la cubierta, rutas de cableado, ubicación de equipos, accesibilidad para mantenimiento y condiciones reales de conexión con la infraestructura eléctrica existente. De esta forma, el proyecto conservaría la validez de su diseño y lo fortalecería mediante ajustes propios de una fase de ejecución.

Asimismo, se recomienda que cualquier etapa posterior del proyecto contemple una actualización de los costos de implementación, considerando precios reales de mercado, posibles variaciones tarifarias de la energía y condiciones comerciales vigentes al momento de una eventual ejecución. Esto permitiría a la empresa tomar decisiones con información económica más cercana al contexto real de inversión, sin alterar la conclusión principal alcanzada en este trabajo sobre la conveniencia de la tecnología seleccionada. Para proyectos futuros con características similares, se recomienda que la selección entre inversores y microinversores no se limite a la comparación de eficiencias nominales, sino que incorpore aspectos como la compatibilidad con la infraestructura eléctrica existente, el nivel de tensión de operación, la complejidad del cableado, la facilidad de mantenimiento, la disponibilidad de soporte técnico y el costo total de implementación. El presente trabajo mostró que, en aplicaciones industriales con cubiertas relativamente homogéneas y demandas energéticas elevadas, estos factores tienen un papel decisivo en la definición de la tecnología más adecuada.

También se recomienda que cualquier desarrollo posterior orientado a la ejecución del sistema incorpore una estrategia de seguimiento y supervisión operativa, mediante herramientas de monitoreo que permitan registrar la producción energética, identificar desviaciones en el desempeño esperado y facilitar la gestión del mantenimiento. Esto contribuiría no solo a garantizar la correcta operación del sistema en el tiempo, sino también a generar información valiosa para futuros proyectos de autogeneración fotovoltaica en el sector industrial. Finalmente, se recomienda que la implementación de este tipo de soluciones se desarrolle bajo un marco riguroso de cumplimiento normativo, coordinación con el operador de red y verificación de condiciones de seguridad eléctrica.

Referencias

- Arsys (2026). *ROI: qué es el retorno de inversión y cómo se calcula*.
<https://www.arsys.es/blog/roi-que-es-el-retorno-de-inversion-y-como-se-calcula>
- AutoSolar (s.f.). *¿Cuál es el proceso de conversión de energía solar a eléctrica con un inversor?*. <https://autosolar.co/energia-solar/cual-es-el-proceso-de-conversion-de-energia-solar-a-electrica-con-un-inversor?srsIid=AfmBOoqmYGU24A4mdC7p1r0f342NIOTSj3AUyJYM1HUdQ733qGfHf80A>
- Cárdenas, D., & Gómez, J. (2021). Comparativa de microinversores e inversores string en sistemas FV residenciales. *Revista Colombiana de Energía y Ambiente*, 8(2), 45–52.
- Cortés C. L., Gómez Gómez G. S., F. Betancur Londoño, Carvajal Quintero S. X., Guerrero González N. (2020). Análisis experimental del desempeño de un sistema solar fotovoltaico con inversor centralizado y con microinversores: caso de estudio Manizales, *Tecnológicas*, vol. 23, no. 47, pp. 1-21.
<https://doi.org/10.22430/22565337.1403>
- Copérnico energía (2025). *Autogeneración, Generación Distribuida y Generación a Gran Escala en Colombia*. <https://www.copernicosas.com/post/autogeneracion-generacion-distribuida-y-generacion-a-gran-escala>
- Datos suministrados por la Ladrillera Arcillas Santa Rosa S.A.S., Magdalena, Colombia, 2024.
- Green Climate Fund, (2017). *Eficiencia energética para la industria y los aparatos eléctricos*. <https://finanzasdelclima.dnp.gov.co/movilizacionrecursos/fondo-verde/oportunidades/Documentos%20compartidos/SAP-EficienciaEnergetica.pdf>
- Gualoto, E. P., & Mendoza, A. J. (2024). Análisis de un estudio para la viabilidad de un sistema fotovoltaico conectado a la red dentro del instituto superior universitario central técnico en la oficina de la carrera de electricidad. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades* 5 (1), 2260 – 2276.
<https://doi.org/10.56712/latam.v5i1.1744>
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2022). Renewable power generation costs in 2021.
- IG Group, (2026). *¿Qué es el análisis técnico?*. <https://www.ig.com/latam/glosario-trading/definicion-de-analisis-tecnico>

- Lorenzo, E. (2014). *Electricidad solar fotovoltaica: Vol. 3. Ingeniería fotovoltaica*. PROGENSA.
- Ortega, M., & López, D. (2020). Evaluación económica de sistemas fotovoltaicos residenciales en zonas urbanas. *Revista Energía y Sociedad*, 15(3), 22–29.
- PVSyst SA. (2023). PVSyst user guide – Photovoltaic system design software. <https://www.pvsyst.com>
- Ramírez, F. (2017). Diseño e implementación de sistemas fotovoltaicos conectados a la red. Editorial UNAL.
- Repsol (2023). *Hacia un consumo en el hogar más eficiente*. <https://www.repsol.com/es/energia-avanzar/energia/consumo-energetico/index.cshtml>
- Sánchez Durán, R. (2020). El futuro y la demanda energética [Tesis doctoral, Universidad de Sevilla]. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=283233>
- ScienceDirect, (2018). *Inversión inicial*. <https://www.sciencedirect.com/topics/economics-econometrics-and-finance/initial-investment>
- Vilariño García, J., & Menéndez Milanés, H. F. (2016). Índices de comportamiento del sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica y teoría de errores. *Revista Tecnológica Química*, 36(3). http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852016000300007
- Vega Carranza, K; Piedra Segura, J; Richmond Navarro, G. (2019). Dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos mediante una interfaz gráfica. *Tecnología en Marcha*. (32)3. Pág. 66-78. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/7448584.pdf>