



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA CENTROAMERICANA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN FASE I

**COMPARACIÓN TECNO-ECONÓMICA ENTRE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CON
SEGUIDORES SOLARES Y CON ESTRUCTURA FIJA EN EL VALLE DE SULA, HONDURAS**

PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO

INGENIERO EN ENERGÍA

PRESENTADO POR:

21711110 HÉCTOR ROLANDO ANDINO GARCÍA

ASESOR: ING. ALICIA MARÍA REYES DUKE

CAMPUS SAN PEDRO SULA;

AGOSTO, 2020

DEDICATORIA

A mi padre, Don José Humberto Andino; por brindarme todo su apoyo desde antes de nacer, por creer siempre en mí, por enseñarme la mayor parte de lo que sé, por ser mi más grande ejemplo de responsabilidad, orden, disciplina, fuerza de voluntad y espíritu de superación.

A mi madre, Doña Rosa García; por ser la mejor madre que Dios pudo haberme concedido, quien me ha brindado su amor en todo momento. Por ser mi apoyo, inspiración, motivación y la mujer que más admiro en todo el mundo.

A mis hermanos mayores, Joaquín y Juan Carlos; quienes han sido mis amigos y mis ejemplos a seguir en muchos aspectos.

A mi novia, Ariana; por estar conmigo en todo momento, por apoyarme en las buenas, pero sobre todo en las malas situaciones y haber hecho de mi vida universitaria una más alegre y placentera.

A mis compañeros y amigos; con quienes compartí esta etapa desde el principio y espero seguir compartiendo a nivel profesional para ser agentes de cambio en nuestro país, mi amado país, por el cual vale la pena luchar para sacar adelante.

AGRADECIMIENTOS

A Dios; quien me ha brindado toda la orientación y capacidad necesaria para desarrollar esta investigación y cumplir cada una de mis metas.

A mi asesora metodológica, la Ing. Alicia Reyes; quien me apoyó en todo momento para la realización de este trabajo, mostrando esfuerzo, dedicación y sobre todo talento en cada una de las etapas de este proyecto.

A mi asesor temático, el PhD. Héctor Villatoro, siendo alguien fundamental para el desarrollo de esta investigación. Un gran profesional a quien respeto y admiro por su capacidad, entrega y pasión para lo que se dedica.

A todos aquellos catedráticos que hicieron algún aporte para alcanzar la finalidad de esta investigación.

EPÍGRAFE

"El valor de una idea radica en el uso de la misma"

-Thomas A. Edison

RESUMEN

La energía solar posee el mayor potencial energético entre todos los tipos de energías renovables. En el 2018 la demanda anual de electricidad a nivel mundial fue de 22,964 TWh. Diariamente la tierra recibe alrededor de 174 PW en forma de irradiación solar. Esto significa que, si se pudiese aprovechar la totalidad de esta radiación, en aproximadamente 8 minutos se podría generar la electricidad necesaria para cubrir la demanda eléctrica anual mundial. Es por esto, que surge la necesidad de implementar sistemas fotovoltaicos que aprovechen de mejor manera el recurso solar, pero que a su vez proporcionen mayor rentabilidad económica. Esta investigación tiene como finalidad evaluar la factibilidad técnica y económica de los sistemas fotovoltaicos con seguidores solares y compararlos con los sistemas de estructura fija en el Valle de Sula, Honduras, Centroamérica. La investigación logró determinar el costo nivelado de la electricidad (LCOE por sus siglas en inglés) de cada tipo de sistema fotovoltaico a partir de la generación de electricidad en los municipios que comprenden el área de estudio y los costos asociados a la inversión inicial, y operación y mantenimiento de cada sistema fotovoltaico. Esta investigación fue realizada implementando una metodología con enfoque cuantitativo, utilizando la recopilación de datos para probar hipótesis, con base en la medición numérica y el análisis estadístico. Considerando el valor del terreno, el sistema fotovoltaico con seguidor de un eje horizontal posee el LCOE más bajo en 14 de los 18 municipios del Valle de Sula. Sin tomar en consideración el valor del terreno, el sistema con el LCOE más bajo en todos los municipios de esta región es el sistema con seguidor de un eje horizontal, luego el sistema con seguidor de dos ejes y por último el sistema con estructura fija.

Palabras clave: *Estructura fija, seguidores solares, sistemas fotovoltaicos.*

ABSTRACT

Solar energy has the greatest energy potential among all types of renewable energies. In 2018, the annual demand for electricity worldwide was 22,964 TWh. Daily, earth receives about 174 PW in the form of solar irradiance. This means that, if all this radiation could be harnessed, in approximately 8 minutes the electricity needed to meet the global annual electricity demand could be generated. Therefore, the need arises to implement photovoltaic systems that take better advantage of the solar resource, but in turn provide greater economic profitability. This article aims to evaluate the technical and economic feasibility of photovoltaic systems with solar trackers and compare them with fixed structure systems in "El Valle de Sula", Honduras, Central America. The research was able to determine the levelized cost of electricity (LCOE) of each type of photovoltaic system from the generation of electricity in municipalities comprising the study area and the costs associated with initial investment, and operation and maintenance of each photovoltaic system. This research was carried out by implementing a methodology with a quantitative approach, using data collection to test hypotheses, based on numerical measurement and statistical analysis. Considering the value of the land, the photovoltaic system with a horizontal axis tracker has the lowest LCOE in 14 of the 18 municipalities of "El Valle de Sula". Without taking into account the value of the land, the system with the lowest LCOE in all municipalities of this region is the system with a horizontal axis tracker, then the system with a dual-axis tracker and finally the system with fixed structure.

Key words: *Fixed structure, photovoltaic systems, solar trackers.*

ÍNDICE DE CONTENIDO

I. Introducción.....	1
II. Planteamiento del Problema	3
2.1 Precedentes del Problema.....	3
2.2 Definición del Problema	4
2.3 Justificación.....	4
2.4 Preguntas de Investigación.....	5
2.5 Objetivos.....	6
2.5.1 Objetivo General.....	6
2.5.2 Objetivos Específicos	6
III. Marco Teórico.....	7
3.1 Análisis de la Situación Actual.....	7
3.1.1 Análisis del Macro-Entorno	7
3.1.2 Análisis del Micro-Entorno	15
3.2 Teorías del Sustento	18
3.2.1 Energía Solar Fotovoltaica	18
3.2.2 Sistemas Fotovoltaicos.....	18
3.3 Conceptualización de Variables de Investigación.....	24
3.3.1 Variable Dependiente	24
3.3.2 Variables Independientes.....	25
IV. Metodología	29
4.1 Enfoque	29
4.2 Variables de Investigación.....	29
4.3 Hipótesis	30
4.4. Técnicas e Instrumentos Aplicados.....	31
4.5 Población y Muestra	32

4.6 Metodología de Estudio.....	32
4.6.1 Especificaciones Técnicas de los Sistemas Fotovoltaicos.....	33
4.6.2 Búsqueda de Información.....	34
4.6.3 Determinación de Variables de Investigación.....	34
4.6.4 Simulaciones en Pvsyst.....	35
4.6.5 Análisis Tecno-Económico.....	35
4.6.6 Limitantes de la Investigación.....	35
4.7 Cronograma de Actividades.....	36
V. Resultados y Análisis.....	37
5.1 Generación Anual de Electricidad.....	37
5.2 Costos de Inversión Inicial, Operación y Mantenimiento.....	40
5.3 Costo de Terreno y Cobertura del Suelo.....	42
5.4 Costo Nivelado de la Electricidad (LCOE).....	43
5.4.1 LCOE Sin Financiamiento y Considerando el Valor del Terreno.....	45
5.4.2 LCOE Con Financiamiento y Considerando el Valor del Terreno.....	49
5.4.3 LCOE Sin Financiamiento y Sin Considerar el Valor del Terreno.....	50
5.4.4 LCOE Con Financiamiento y Sin Considerar el Valor del Terreno.....	51
5.5 Análisis de Sensibilidad.....	52
VI. Conclusiones.....	54
VII. Recomendaciones.....	56
VIII. Aplicabilidad/Implementación.....	57
IX. Evolución De Trabajo Actual / Trabajo Futuro.....	58
Bibliografía.....	59
Anexos.....	62

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1-Comparación de la electricidad mensual generada por cada sistema fotovoltaico en Atenas, Grecia.....	8
Ilustración 2-Comparación de la electricidad mensual generada por cada sistema fotovoltaico en Stuttgart, Alemania.....	9
Ilustración 3-Comparación de la electricidad mensual generada por cada sistema fotovoltaico en Aberdeen, Reino Unido.....	10
Ilustración 4-Comparación de la electricidad anual generada por cada sistema fotovoltaico en una hectárea ubicada en Sudáfrica.....	12
Ilustración 5-Comparación del Costo del kWh en ZAR por cada sistema fotovoltaico en una hectárea ubicada en Sudáfrica.....	13
Ilustración 6-Comparación del área (hectáreas) necesarias de cada sistema fotovoltaico para instalar un 1 MWp en Sudáfrica.	14
Ilustración 7-Fabricantes de seguidores solares mejor posicionados a nivel mundial en 2018. ...	15
Ilustración 8-Diagrama de un sistema fotovoltaico aislado	19
Ilustración 9-Diagrama de un sistema fotovoltaico interconectado a la red.....	20
Ilustración 10-Instalación Fotovoltaica sobre techo.....	21
Ilustración 11-Instalación solar sobre suelo.....	21
Ilustración 12-Eje de rotación del seguidor solar de un eje horizontal.....	22
Ilustración 13-Eje de rotación del seguidor solar de un eje vertical.....	23
Ilustración 14-Movimientos del seguidor solar de dos ejes.....	23
Ilustración 15-Efecto de variables independientes en la variable dependiente.....	24
Ilustración 16-Dimensiones de las variables independientes	29
Ilustración 17-Mapa del Valle de Sula.....	32
Ilustración 18-Generación Anual de Electricidad para el primer año en el Valle de Sula	39
Ilustración 19-Costos Específicos de Capital en el Valle de Sula.	40
Ilustración 20- Costos de Operación y Mantenimiento Anual de los Sistemas Fotovoltaicos.	41
Ilustración 21- Cobertura del Suelo de cada Sistema Fotovoltaico.....	43

Ilustración 22-LCOE sin financiamiento y considerando el valor del terreno.	45
Ilustración 23-LCOE de sistema fotovoltaico fijo en municipios del Valle de Sula	46
Ilustración 24-LCOE de sistema con seguidor de un eje en municipios del Valle de Sula	47
Ilustración 25-LCOE de sistema con seguidor de dos ejes en municipios del Valle de Sula	48
Ilustración 26-LCOE con financiamiento y considerando el valor del terreno.	49
Ilustración 27-LCOE sin financiamiento y sin considerar el valor del terreno.....	50
Ilustración 28-LCOE con financiamiento y sin considerar el valor del terreno.....	51

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1- Porcentaje de GCR ideal según tipo de sistema fotovoltaico.....	27
Tabla 2- Cronograma de Actividades.....	36
Tabla 3- Especificaciones Técnicas de los Sistemas Fotovoltaicos.....	37
Tabla 4- Matriz de decisión para módulo fotovoltaico	38
Tabla 5- Matriz de decisión para inversor solar.....	38
Tabla 6- Precio del Metro Cuadrado en municipios del Valle de Sula.....	42
Tabla 7- Parámetros de Entrada para el Análisis Tecno-Económico	44
Tabla 8- Variación del LCOE sin financiamiento de acuerdo con el valor del terreno.....	52
Tabla 9- Variación del LCOE con financiamiento de acuerdo con el valor del terreno.....	53

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1-Cálculo simple del costo nivelado de la electricidad	25
Ecuación 2-Ratio DC/AC.....	26
Ecuación 3-Fórmula para calcular la inclinación óptima de módulos solares.	27

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1-Especificaciones Técnicas de los Módulos Solares	62
Anexo 2-Especificaciones Técnicas de los Inversores Solares.....	64
Anexo 3-Especificaciones Técnicas del Seguidor de un Eje Horizontal.....	65
Anexo 4-Especificaciones Técnicas del Seguidor de Dos Ejes	66
Anexo 5-Resumen de Reporte PVsyst para Sistema Fotovoltaico con estructura fija.....	67
Anexo 6-Resumen de Reporte PVsyst para Sistema Fotovoltaico con seguidor de un eje.....	67
Anexo 7-Resumen de Reporte PVsyst Sistema Fotovoltaico con seguidor de dos ejes.....	68

LISTA DE SIGLAS

LCOE *Levelized Cost Of Electricity* (Costo nivelado de electricidad)

PIB Producto Interno Bruto

STC *Standard Test Conditions* (Condiciones estándar de prueba)

CRF *Capital Recovery Factor* (Factor de recuperación de capital)

I. INTRODUCCIÓN

Desde que el hombre se ha preocupado por aprovechar la energía proveniente del sol, se ha dado cuenta que la incidencia solar es mayor en un objeto a medida que éste sigue la trayectoria del sol. Los sistemas solares fotovoltaicos son diseñados con la finalidad de obtener el mayor aprovechamiento posible del recurso solar, es por esto, que los sistemas fotovoltaicos con seguidores solares surgen para seguir la trayectoria del sol e incrementar la producción de electricidad. Evaluar qué tan factible es implementar esta clase de sistemas fotovoltaicos requiere múltiples consideraciones tanto técnicas como económicas, si bien es cierto que este tipo de sistemas aumentan la electricidad generada, también existe un incremento en costos asociados a su implementación como ser, el costo de inversión inicial, costos de operación y mantenimiento.

Este trabajo investigativo evaluará la factibilidad tecno-económica de los sistemas fotovoltaicos con seguidores solares en el Valle de Sula, mediante la comparación con los sistemas fotovoltaicos de estructura fija. Dicha comparación será a partir del *LCOE* de los sistemas fotovoltaicos con seguidores solares y con estructura fija, ya que, mediante este parámetro se logrará determinar qué clase de sistema fotovoltaico es más conveniente implementar en el Valle de Sula.

Esta investigación se desarrollará con el principal propósito de facilitar la toma de decisiones sobre qué tipo de sistema fotovoltaico es más viable implementar a partir del *LCOE* más bajo, ya que en la actualidad no hay un estudio para el Valle de Sula que demuestre si los sistemas fotovoltaicos con seguidores solares son más viables que los sistemas con estructura fija, o viceversa.

El informe estará compuesto de nueve secciones incluyendo la presente introducción. Las restantes ocho secciones son las siguientes: Planteamiento del problema, sección en la cual se presentarán los precedentes, definición y justificación del problema, además de los objetivos y preguntas de investigación. El Marco Teórico, también conocida como fundamentación teórica, es el condensado bibliográfico de toda información, evidencias de segunda o tercera fuente. La

Metodología, sección donde se mostrará el enfoque investigativo, variables de investigación, técnicas e instrumentos aplicados. Resultados y Análisis, aquí se presentarán los hallazgos de la investigación y se interpretarán estos resultados obtenidos. Conclusiones, esta sección se relacionará directamente con los objetivos y preguntas de investigación. Recomendaciones, éstas irán de la mano de las conclusiones. Aplicabilidad/ Implementación, en esta sección se determinará la aplicabilidad de cada tipo de sistema fotovoltaico en función del análisis financiero. Evolución de trabajo actual/ trabajo futuro, esta será la última sección de este informe y presentará cuál podría ser una segunda etapa de esta investigación.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Uno de los mayores desafíos de la energía solar fotovoltaica consiste en mejorar los sistemas tanto en eficiencia como en costos de producción.

Los sistemas fotovoltaicos con seguidores solares permiten mayor aprovechamiento de la radiación solar durante el día y en consecuencia generan mayor cantidad de electricidad. Estos sistemas fotovoltaicos requieren un mayor costo de inversión inicial, operación, mantenimiento y extensión territorial para su montaje en comparación a los sistemas con estructura fija. Este tipo de sistemas no son viables en cualquier lugar, ya que deben existir condiciones ambientales favorables para que el incremento de la producción de electricidad sea mucho mayor que los sistemas fotovoltaicos con estructura fija.

Un reporte de la Comisión Económica para América Latina (CEPAL) señala que el costo promedio en Centroamérica en 2016 del kWh fue de 13.48 centavos de dólar, mientras tanto el costo promedio en Honduras del kWh fue superior al de la región, al ser de 13.77 centavos de dólar (CEPAL, 2016).

El alto precio de la electricidad, un servicio eléctrico de baja calidad y poca confiabilidad proporcionado por la empresa estatal de energía han prácticamente obligado a que muchas empresas tengan que generar de forma parcial o total la electricidad que demandan y en muchos casos mediante energía solar fotovoltaica.

Actualmente no se cuenta con un estudio que facilite la decisión sobre si implementar los sistemas fotovoltaicos con estructura fija o con seguidores solares en el Valle de Sula.

2.1 PRECEDENTES DEL PROBLEMA

El primer registro de la utilización de un sistema de seguimiento solar data de finales del siglo XVIII, cuando el químico francés Antoine Lavoisier desarrolló un horno solar que consistía en dos lentes muy potentes que concentraban la radiación en un punto fijado alcanzando altas temperaturas capaces de fundir metales (Valle, 2015)

En Estados Unidos en la década de los 90's algunos fabricantes de sistemas fotovoltaicos comenzaron a cambiar su elección desde una instalación de paneles fotovoltaicos fijos a una de seguimiento solar, comenzando a favorecer el desarrollo y uso de seguidores solares debido a que se alcanzaba un incremento en cuanto a producción de electricidad en alrededor de un 32% a través del uso de seguidores solares de un eje horizontal (hogarsense, 2020).

Entre 2015 y 2017, MECER y Helios, dos plantas fotovoltaicas en el sur de Honduras iniciaron operaciones con 25.6 MW cada una, actualmente cuentan con seguidores de un eje horizontal que han permitido incrementar en alrededor de un 33% la producción de electricidad (Jackson, 2020).

2.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El problema consiste en que actualmente no existe un estudio capaz de demostrar que tipo de sistema fotovoltaico es más conveniente en el Valle de Sula y que a su vez permita facilitar la decisión sobre si implementar sistemas fotovoltaicos con estructura fija o con seguidores solares.

Es por eso que la presente investigación tiene como finalidad determinar el incremento en la producción de electricidad mediante sistemas fotovoltaicos con seguidores solares y compararlos con sistemas de estructura fija para determinar si son tecno-económicamente viables en el Valle de Sula.

2.3 JUSTIFICACIÓN

Esta investigación se desarrolla en el Valle de Sula, la cual es considerada como la región económica más activa a nivel nacional, aportando anualmente alrededor de 124 mil millones de Lempiras al PIB, esto significa que más del 60% del PIB proviene de esta región del país. El municipio de San Pedro Sula se encuentra en esta región y es catalogada como la capital industrial de país, más de 20 ramas industriales generan un alto porcentaje de los ingresos de los sampedranos (Plan de Gestión Municipal San Pedro Sula, 2015).

Más de 40 distintos comercios solamente en San Pedro Sula cuentan actualmente con sistemas fotovoltaicos para suplir una parte de su demanda eléctrica. En 2018 la potencia instalada

de sistemas fotovoltaicos en San Pedro Sula fue de 8.493 MW, representando un incremento en la capacidad instalada del 100% respecto al año 2017.

El desarrollo de la energía solar fotovoltaica en esta región y principalmente en San Pedro Sula genera muy buenas expectativas y se estima que para el año 2030 la capacidad instalada en esta ciudad del Valle de Sula sea de 194.49 MW (Reyes, 2018).

Es sumamente necesario saber qué clase de sistema fotovoltaico es más conveniente implementar en esta región, por ese motivo, mediante esta investigación se pretende demostrar cuál sistema es más factible técnica y económicamente en el Valle de Sula, ya que servirá a su vez para facilitar la toma de decisiones en cuanto a qué tipo de sistema fotovoltaico es mejor implementar, con seguidores solares o con estructura fija.

2.4 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

1. ¿Cuál es el incremento porcentual de producción de electricidad de los sistemas fotovoltaicos utilizando seguidores solares en comparación con los sistemas fijos en el Valle de Sula?
2. ¿Cuánto se incrementan los costos de inversión inicial, operación y mantenimiento al implementar sistemas fotovoltaicos con seguidores solares en lugar de sistemas fotovoltaicos con estructura fija?
3. ¿Cuánta área se requiere para el montaje de sistemas fotovoltaicos con seguidores solares y sistemas con estructura fija?
4. ¿Qué tipo de sistema fotovoltaico es más conveniente a partir del *LCOE* más bajo en el Valle de Sula?
5. ¿Qué sucedería con los valores del *LCOE* para cada sistema fotovoltaico si no se considera el valor del terreno?
6. ¿Existe homogeneidad en cuanto a la viabilidad de cada sistema fotovoltaico en todo el Valle de Sula?

2.5 OBJETIVOS

Los objetivos de la investigación son los que marcarán el camino a seguir de la misma, en este apartado se presentará el objetivo general y los objetivos específicos.

2.5.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la factibilidad tecno-económica de los sistemas fotovoltaicos con seguidores solares y compararlos con sistemas fotovoltaicos de estructura fija para determinar cuál es más conveniente a partir del *LCOE* más bajo en el Valle de Sula.

2.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Determinar la electricidad generada de cada sistema fotovoltaico en el Valle de Sula mediante simulaciones en PVsyst.
2. Establecer los costos de inversión inicial, operación y mantenimiento de los sistemas fotovoltaicos con seguidores solares y compararlos con los sistemas de estructura fija.
3. Determinar el área necesaria para el montaje de sistemas fotovoltaicos con seguidores solares y sistemas con estructura fija.
4. Desarrollar un análisis financiero con financiamiento y sin financiamiento que permita obtener el *LCOE* para cada uno de los sistemas fotovoltaicos en el Valle de Sula.
5. Comparar los sistemas fotovoltaicos con estructura fija y con seguidores solares mediante los valores de *LCOE* obtenidos del análisis financiero.
6. Evaluar cada uno de los sistemas e identificar cuál es la mejor opción a partir del *LCOE* más bajo.

III. MARCO TEÓRICO

En esta sección se analiza la situación actual mediante tendencias e investigaciones que se han desarrollado en varios países a nivel de macro y micro-entorno, además se presentan teorías del sustento y conceptualización de los múltiples componentes que conforman cada sistema fotovoltaico.

3.1 ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL

Mediante un análisis de la situación actual se conocerán las tendencias tanto de energía solar fotovoltaica como de los sistemas con seguidores solares, y cuáles han sido los principales hallazgos de investigaciones sobre sistemas fotovoltaicos con estructura fija y con seguidores solares que se han efectuado en diversos países.

3.1.1 ANÁLISIS DEL MACRO-ENTORNO

En el análisis del macro-entorno se mostrarán dos aspectos importantes para comprender el objetivo primordial de esta investigación. En primer lugar, estudios realizados en distintos países alrededor del mundo respecto al rendimiento de sistemas fotovoltaicos con seguidores solares, y por otra parte se presentarán algunas tendencias de la energía solar fotovoltaica y sistemas con seguidores solares a nivel mundial.

3.1.1.1 ESTUDIOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CON SEGUIDORES SOLARES EN EL RESTO DEL MUNDO

En este apartado se mostrarán los principales resultados de investigaciones desarrolladas en países alrededor del mundo sobre sistemas fotovoltaicos con seguidores solares.

A) ATENAS, GRECIA

El estudio se desarrolló mediante la comparación de un sistema fotovoltaico con seguidor de dos ejes y otro sistema con estructura fija, ambos con una capacidad nominal DC de 6.4 kWp, mediante la instalación de 32 paneles solares policristalinos con una eficiencia de aproximadamente 13.6%. Se utilizó un inversor de 6 kW con una eficiencia de 96.4%. El seguidor

solar utilizado en este caso de estudio fue el Ovak T-6600, el movimiento horizontal del seguidor solar comprende 223° (desde -111.5° hasta 111.5°, siendo el sur=0) y movimiento vertical desde 20° hasta 90°.

Las simulaciones fueron desarrolladas mediante el software TRNSYS. Debido a la latitud sur y al clima soleado de la región, la utilización de este tipo de seguidor solar incrementó la producción de electricidad en un 34.8% en relación con el sistema fotovoltaico de estructura fija cuyo ángulo de inclinación fue de 31°. La Tasa de rendimiento anual de igual manera aumentó un 0.8%.

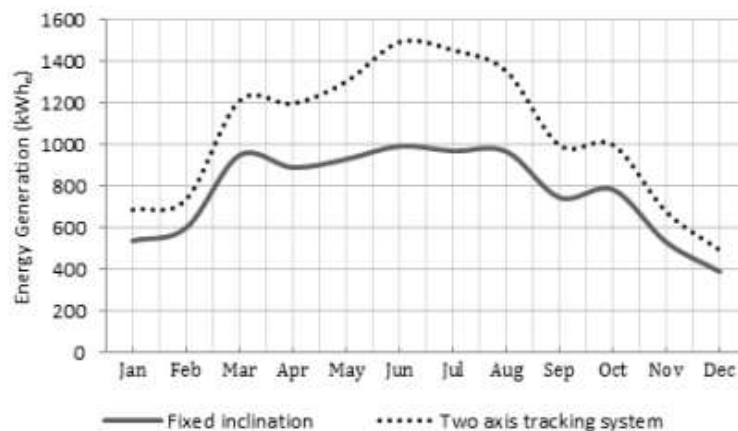


Ilustración 1-Comparación de la electricidad mensual generada por cada sistema fotovoltaico en Atenas, Grecia.

Fuente: (Petros J. Axaopoulos & Emmanouil D. Fylladitakis, MSc, 2013)

Como se puede apreciar en la Ilustración 1, la producción de electricidad por parte del sistema fotovoltaico con seguidor de dos ejes fue mayor al sistema con estructura fija en todos los meses del año.

El análisis económico concluye en que los sistemas fotovoltaicos a baja escala con seguidores solares de dos ejes proporcionan un mejor VAN para el proyecto en comparación a sistemas fotovoltaicos con estructura fija (Petros J. Axaopoulos & Emmanouil D. Fylladitakis, MSc, 2013).

B) STUTTGART, ALEMANIA

En este sitio, de igual manera se desarrolló la comparación entre un sistema fotovoltaico con seguidor solar de dos ejes y un sistema con estructura fija, bajo las mismas condiciones que se establecieron en Atenas, Grecia, solamente que en este caso la inclinación del sistema con estructura fija fue de 39°.

La irradiación solar anual sobre una superficie horizontal en Alemania varía entre 780kWh/m² and 1,240kWh/m². Disfrutando de un promedio de aproximadamente 1,700 horas de sol al año, la ciudad de Stuttgart puede ser considerada como un sitio ideal para evaluar al resto del país. Mediante el sistema fotovoltaico con seguidor de dos ejes se logró un incremento en la producción de electricidad en alrededor de un 28.7%, mientras tanto la tasa de rendimiento anual aumento en un 1.1%

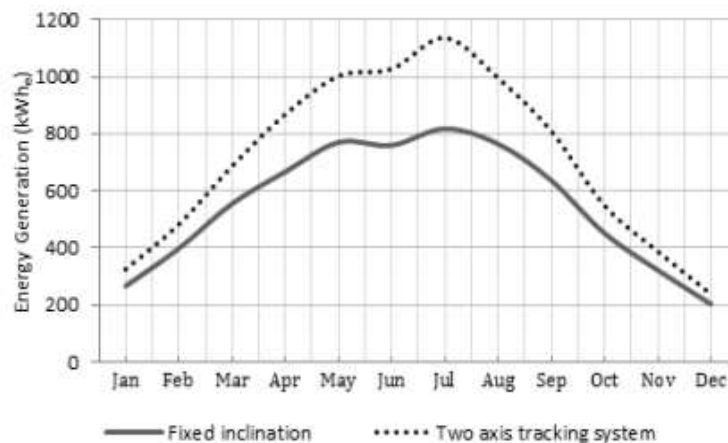


Ilustración 2-Comparación de la electricidad mensual generada por cada sistema fotovoltaico en Stuttgart, Alemania.

Fuente: (Petros J. Axaopoulos & Emmanouil D. Fylladitakis, MSc, 2013)

Al igual que el estudio desarrollado en Atenas, Grecia; se puede observar mediante la Ilustración 2 que en todos los meses del año el sistema fotovoltaico con seguidor solar de dos ejes generó más electricidad que el sistema con estructura fija.

C) ABERDEEN, REINO UNIDO

Para este sitio en Escocia también se establecieron las mismas condiciones que en Grecia y Alemania. A pesar del clima marítimo existente en Escocia, Aberdeen tiene alrededor de 1,400 horas de sol al año, la alta latitud permite días cortos durante el invierno y días largos durante el verano. Para el sistema fotovoltaico con estructura fija se estableció una inclinación de 46°.

La mayor parte de la generación de electricidad en invierno proviene de radiación difusa, y, por lo tanto, el uso de un seguidor solar no produce un incremento significativo del rendimiento. Por el contrario, durante los meses de verano se produjo un incremento de la producción de electricidad en alrededor de un 33%. Y de forma anual el incremento fue de un 30.4% en la producción de electricidad y de 1.3 % en la tasa de rendimiento anual.

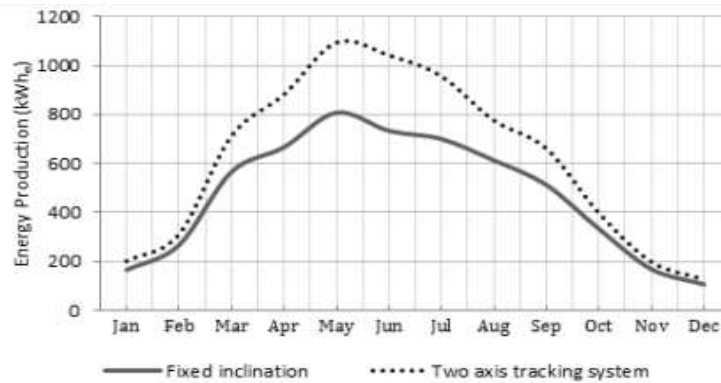


Ilustración 3-Comparación de la electricidad mensual generada por cada sistema fotovoltaico en Aberdeen, Reino Unido.

Fuente: (Petros J. Axaopoulos & Emmanouil D. Fylladitakis, MSc, 2013)

Tal y como se mencionó anteriormente, el aumento en la producción de electricidad por parte del sistema fotovoltaico con seguidor solar de dos ejes se produce principalmente en los meses de verano, como puede apreciarse en la Ilustración 3.

El análisis económico de este estudio concluyó en que los sistemas fotovoltaicos con seguidores solares de dos ejes no son tan atractivos en comparación a sistemas fotovoltaicos con estructura fija en este sitio al igual que en Stuttgart, Alemania, ya que proporcionan un VAN inferior.

D) REGIÓN URAL EN RUSIA.

Geográficamente la región Ural está situada entre el este de Europa y el oeste de las llanuras Serbias. El estudio se desarrolló para comparar el rendimiento de un sistema fotovoltaico fijo y un sistema con seguidores solar de dos ejes durante días soleados y días nublados.

El panel solar utilizado para este estudio fue un "A FSM 30-12" de 30 W y una eficiencia de 17.1%. El estudio se desarrolló durante todo el mes de Agosto y demostró que en días soleados se obtuvo un incremento en la producción de electricidad de 89.14%, mientras tanto en días nublados el incremento fue de 35.78%. De esta manera durante todo ese mes el incremento en cuanto a producción de electricidad mediante un seguidor solar de dos ejes fue de 86.52% (Masih, 2019).

E) SUR DE ARABIA SAUDITA

Este estudio se desarrolló a través de HOMER, mediante un 1 kWp se logró determinar qué sistema fotovoltaico con seguidores solares permite incrementar la producción de electricidad hasta en un 40% en comparación con sistemas fotovoltaicos de estructura fija.

El análisis económico de este estudio demuestra que aquellos sistemas fotovoltaicos con seguidores solares de un eje vertical o de dos ejes proporcionan un *LCOE* inferior a sistemas con estructura fija (Hassan Al Garni, 2017)

F) KURUKSHETRA, INDIA

Esta investigación también fue desarrollada mediante el software HOMER, el principal hallazgo de esta investigación consiste en que un sistema fotovoltaico con un seguidor solar de dos ejes requiere una menor instalación de paneles solares para alcanzar la misma potencia que un sistema con estructura fija, pero a su vez el *LCOE* es mayor que el del resto de sistemas fotovoltaicos (Om Krishan, 2018).

G) KUALA LUMPUR, MALASIA

Este estudio se desarrolló mediante la comparación entre un sistema fotovoltaico con un seguidor de dos ejes y un sistema con estructura fija. Se determinó que para esta ubicación el sistema con un seguidor de dos ejes tiene un incremento en producción de electricidad de 82.12 % durante días soleados y de un 24.91%, durante días nublados (J. F. Lee, 2013)

H) BLOEMFONTEIN, SUDÁFRICA

Este estudio desarrollado en Sudáfrica estableció en dos escenarios para evaluar la factibilidad tecno-económica de sistemas fotovoltaicos con seguidores solares. En el primer escenario se determinó la producción de electricidad en una hectárea por parte de un sistema fotovoltaico con estructura fija, uno de dos seguidores solares y un sistema de un solo seguidor.

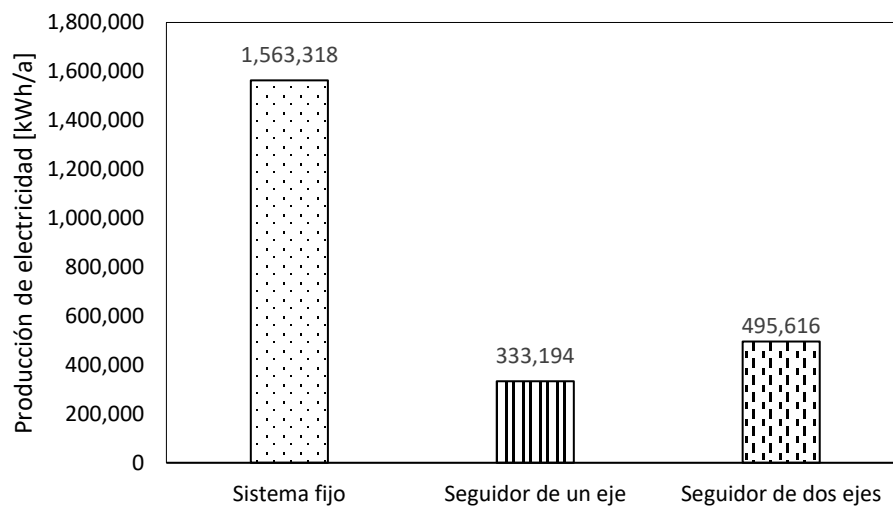


Ilustración 4-Comparación de la electricidad anual generada por cada sistema fotovoltaico en una hectárea ubicada en Sudáfrica.

Fuente: (Vermaak, 2014)

La Ilustración 4 claramente muestra que la producción de electricidad de un sistema fotovoltaico con estructura fija es mayor en comparación con los otros sistemas que cuentan con seguidores solares, esto se debe a que, en un área determinada, la potencia instalada de un sistema fotovoltaico con estructura fija es mayor que los sistemas con seguidores solares ya que éstos últimos ocupan mucho más espacio.

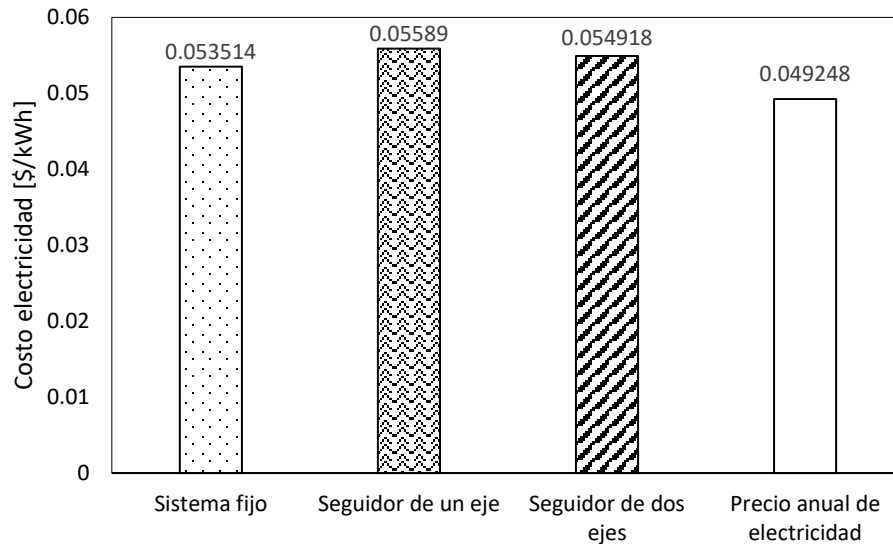


Ilustración 5-Comparación del Costo del kWh en ZAR por cada sistema fotovoltaico en una hectárea ubicada en Sudáfrica.

Fuente: (Vermaak, 2014)

Mediante la Ilustración 5 se logra apreciar que el menor costo del kWh en este caso lo presenta el sistema fotovoltaico con estructura fija, mientras tanto el más alto le corresponde al sistema con seguidor de un eje.

El otro escenario bajo el cual se desarrolló este estudio fue mediante la instalación de un 1 MWp de los diferentes tipos de sistemas fotovoltaicos evaluados en el escenario anterior.

La finalidad era evaluar cuantas hectáreas de área se requieren para instalar esa potencia para cada tipo de sistema fotovoltaico.

El área es un aspecto sumamente importante que se debe considerar al realizar una comparación entre distintos sistemas fotovoltaicos, ya sea con estructura fija o con seguidores solares debido a que éstos último requieren mayor distancia entre filas y columnas por la estructura de los seguidores solares y el diseño adecuado para evitar sombras entre ellos mismos por el movimiento a lo largo del día.

En la Ilustración 6 se puede observar que el sistema fotovoltaico con un solo seguidor requiere mucho menos espacio que los demás tipos de sistemas que utilizan seguidores solares.

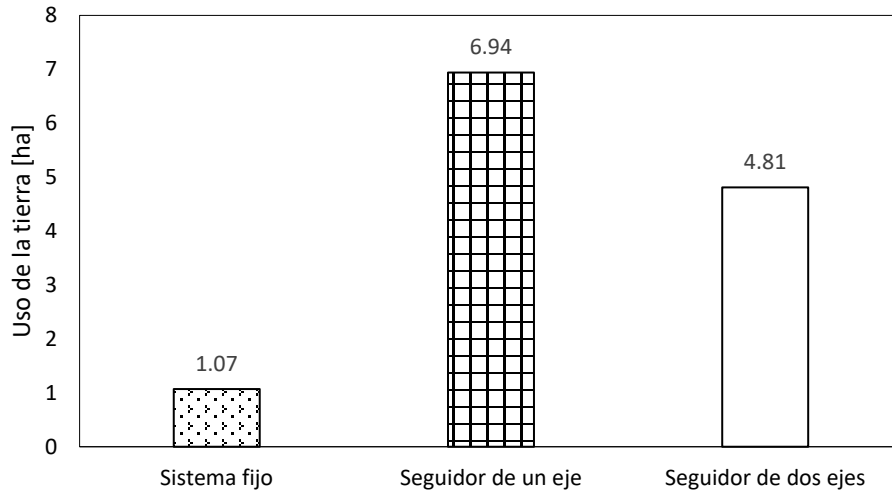


Ilustración 6-Comparación del área (hectáreas) necesarias de cada sistema fotovoltaico para instalar un 1 MWp en Sudáfrica.

Fuente: (Vermaak, 2014)

En conclusión, los sistemas fotovoltaicos con seguidores solares en esta región Sudafricana no resultan tan atractivos en comparación a los sistemas que cuentan con una estructura fija (Vermaak, 2014).

3.1.1.2 TENDENCIAS DE LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA A ESCALA GLOBAL

Se espera que para el año 2050 la energía solar fotovoltaica se convierta en la segunda fuente de generación eléctrica más importante en el mundo, solamente por debajo de la energía eólica. La energía solar fotovoltaica generaría aproximadamente el 25% de la electricidad total necesaria a nivel mundial (IRENA, 2019).

El país referente en energía solar fotovoltaica a nivel mundial es China, pero para el 2020 se proyecta que la instalación de potencia quedará por debajo del récord histórico registrado en 2017, cuando este país asiático alcanzó 50 GW de potencia solar fotovoltaica.

Europa ha tenido un gran crecimiento en energía solar fotovoltaica en los últimos años y se espera que para el año 2020 se instalen 24,000 MW de nueva capacidad.

Se prevé que Estados Unidos tendrá un crecimiento de la potencia instalada del 20 % para el año 2020, de esta manera se convertirá en el segundo país con más potencia fotovoltaica instalada en el mundo, solamente por detrás de China (IHS, 2019).

3.1.1.3 TENDENCIAS DE LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CON SEGUIDORES SOLARES A ESCALA GLOBAL

En el 2017 los envíos mundiales de seguidores solares alcanzaron una cifra récord de 14.5 GW, lo que representa un crecimiento del 32% sobre el año anterior (GMT, 2018).

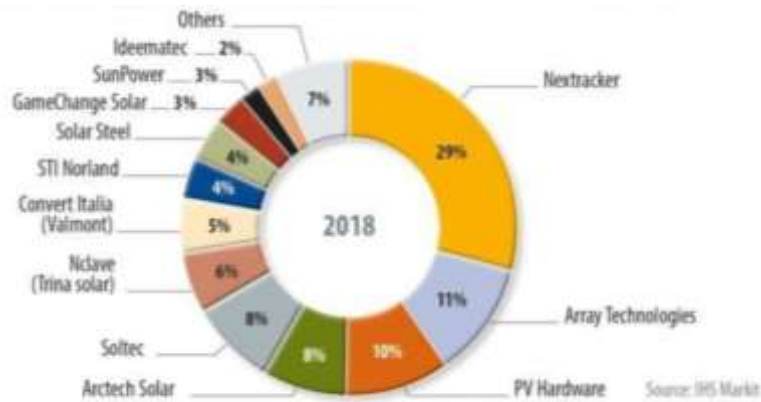


Ilustración 7-Fabricantes de seguidores solares mejor posicionados a nivel mundial en 2018.

Fuente: (IHS, 2019).

En nuevas instalaciones fotovoltaicas con seguidores solares durante 2019, tuvieron mayor participación los seguidores de un eje, por encima de los seguidores con dos ejes. Se espera que el mercado global de seguidores solares crezca a una tasa compuesta anual de más del 25% durante el periodo 2020-2025 (Intelligence, 2019).

3.1.2 ANÁLISIS DEL MICRO-ENTORNO

En el análisis del micro-entorno se mostrarán algunas investigaciones desarrolladas sobre sistemas fotovoltaicos con seguidores solares en Latinoamérica y las principales tendencias de la energía solar fotovoltaica y sistemas con seguidores solares para esa región del continente Americano.

3.1.2.1 ESTUDIOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CON SEGUIDORES SOLARES EN LATINOAMÉRICA

En este apartado se mostrarán los principales resultados de investigaciones desarrolladas en países de Latinoamérica sobre sistemas fotovoltaicos con seguidores solares.

A) SONORA, MÉXICO

En este estudio realizado en el Instituto Tecnológico de Sonora se evaluó la producción de un sistema fotovoltaico fijo y un sistema fotovoltaico con seguidores solares. Los datos se obtuvieron de la plataforma MyEnlighten Manager durante todo el mes de abril del 2018.

El seguidor de un eje tuvo una producción de electricidad de 1098.192 kWh, lo que equivale a un 36.76% más que el sistema fotovoltaico con estructura fija que tuvo una producción de 802.968 kWh (Adriana Robles, 2018).

B) SAN SALVADOR, EL SALVADOR

Esta investigación fue desarrollada en la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador, la finalidad de esta investigación fue comparar la producción de electricidad entre un sistema fotovoltaico con seguidor de un eje y un sistema con estructura fija.

Se logró determinar que la producción de electricidad mediante un sistema fotovoltaico con un seguidor de eje horizontal incrementó un promedio de 38% , en un día soleado, lo que representa un incremento promedio de 1.29 kWh/día, y para días nublados un incremento del 18% según los datos obtenidos entre el 12 y 18 de Junio de 2016 (Pedro García, 2016).

3.1.2.2 TENDENCIAS DE LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA EN LATINOAMÉRICA

Latinoamérica podría incrementar por un factor de 40 su capacidad solar instalada para el año 2050, ya que se estima que las inversiones anuales serán superiores a los \$7,000 millones, es por esto que se espera que la capacidad instalada pase de los 7 GW que existen actualmente a más de 280 GW (IRENA, 2019).

3.1.2.3 TENDENCIAS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CON SEGUIDORES SOLARES EN LATINOAMÉRICA

Se prevé que entre el 2019 y 2023 se desplegarán más de 150 GW de sistemas de seguimiento fotovoltaico en las Américas, que representa aproximadamente un tercio de las instalaciones fotovoltaicas en tierra durante ese periodo (Barati, 2019).

Los sistemas fotovoltaicos con seguidores solares aumentarán su participación en los proyectos montados en tierra en un 43% para el 2023 en Latinoamérica (BID, 2019).

3.2 TEORÍAS DEL SUSTENTO

En este apartado se presentarán las teorías en las cuales se sustenta la presente investigación.

3.2.1 ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

La energía solar fotovoltaica es un tipo de energía renovable que consiste en la transformación directa de la radiación solar en energía eléctrica (solar energía, 2009).

3.2.2 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Un sistema fotovoltaico es un conjunto de dispositivos que aprovechan la radiación proveniente del sol y la convierten en electricidad (quiminet, 2011).

3.2.2.1 PRINCIPALES COMPONENTES DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO

Un sistema fotovoltaico se compone principalmente de 4 elementos: El panel solar, el inversor, el regulador y la batería (en el caso de sistemas aislados).

A) PANEL SOLAR, GENERADOR O MÓDULO FOTOVOLTAICO

Es el elemento principal de las instalaciones solares fotovoltaicas, convierte la energía proveniente del sol en energía eléctrica a corriente continua. Estos paneles fotovoltaicos se componen de células de silicio, que es un material semiconductor. Los paneles solares pueden ser monocristalinos, policristalinos y amorfo.

B) REGULADOR DE CARGA

Este componente tiene la función de administrar la energía de manera eficiente, son el nexo entre los paneles solares y el resto de los componentes del sistema fotovoltaico. Prolonga la vida útil de las baterías evitando que se sobrecargue y se sobredescargue el sistema.

C) BATERÍA

En este componente se almacena la electricidad del sistema fotovoltaico. Solamente se encuentran presentes en sistemas aislados.

D) INVERSOR

La función principal de este componente es convertir la corriente continua en corriente alterna, además es un elemento imprescindible en las instalaciones fotovoltaicas interconectadas a la red aunque también suele estar presente en instalaciones fotovoltaicas aisladas, generalmente aquellas destinadas a la electrificación de viviendas (hogarsense, 2020).

3.2.2.2 CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS SEGÚN SU CONEXIÓN A LA RED ELÉCTRICA

Los sistemas fotovoltaicos dependiendo de su conexión a la red eléctrica se pueden clasificar en aislados e interconectados a la red.

A) SISTEMAS FOTOVOLTAICOS AISLADOS

Los sistemas fotovoltaicos aislados o también denominados autónomos, producen electricidad para satisfacer el consumo de cargas eléctricas no conectadas a la red, empleando un sistema de acumulación que permita acumular la electricidad en periodos donde el consumo sea inferior a la generación de electricidad (Perpiñán, 2011).

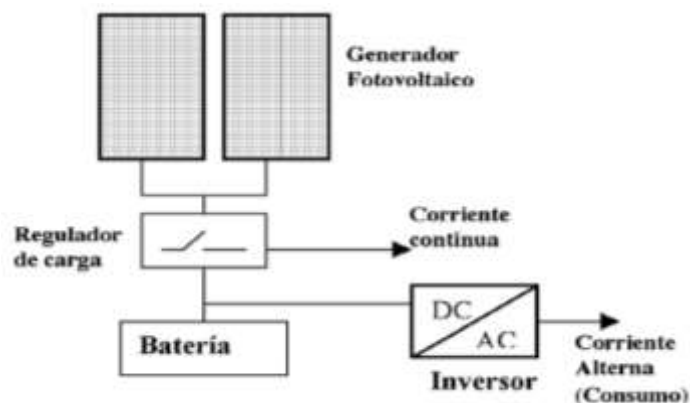


Ilustración 8-Diagrama de un sistema fotovoltaico aislado

Fuente: (Lema, 2015)

B) SISTEMAS FOTOVOLTAICOS INTERCONECTADOS A LA RED

Un sistema fotovoltaico interconectado a la red es un sistema cuya función principal es producir energía eléctrica en condiciones adecuadas para poder ser inyectadas a la red convencional. La energía producida por este sistema será consumida parcial o totalmente en las zonas más cercanas, y la energía sobrante será inyectada para su distribución en otros puntos de consumo (Perpiñán, 2011).

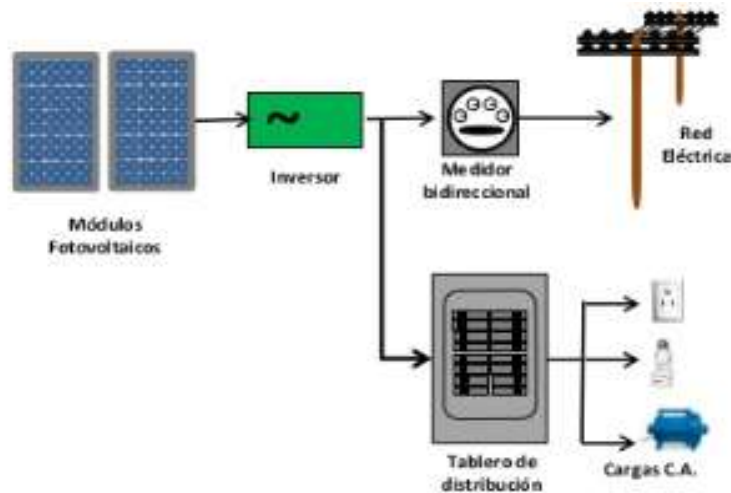


Ilustración 9-Diagrama de un sistema fotovoltaico interconectado a la red.

Fuente: (Slideshare, 2011)

3.2.2.3 CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS SEGÚN EL LUGAR DEL MONTAJE

Los sistemas fotovoltaicos también pueden clasificarse en función de lugar donde se instalan, generalmente estas instalaciones son sobre techo y en terreno.

A) SISTEMAS FOTOVOLTAICOS SOBRE TECHO

Esta clase de instalación utiliza el espacio en techos para aprovechar el recurso solar, este tipo de instalación suele usarse a nivel residencial y en algunas industrias.



Ilustración 10-Instalación Fotovoltaica sobre techo.

Fuente: (Autosolar, 2018)

B) SISTEMAS FOTOVOLTAICOS SOBRE SUELO

Los sistemas fotovoltaicos sobre suelo también reciben el nombre de granjas solares, este tipo de sistemas fotovoltaicos suelen realizarse para instalar grandes potencias. El diseño de estos sistemas tiene como objetivo maximizar la producción energética anual del sistema con el menor coste y la menor ocupación de terreno posible (Perpiñán, 2011).



Ilustración 11-Instalación solar sobre suelo

Fuente: (Sonora, 2019)

3.2.2.4 CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS SEGÚN SU MOVILIDAD

Los sistemas fotovoltaicos pueden clasificarse según su movilidad en sistemas con estructura fija o también llamados estáticos y sistemas con seguidores solares.

A) SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CON ESTRUCTURA FIJA

Son aquellos sistemas fotovoltaicos que cuentan con una inclinación y azimuth definido y que no varía de acuerdo con la trayectoria del sol durante el día. Este tipo de sistemas fotovoltaicos pueden montarse sobre techo y sobre suelo.

B) SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CON SEGUIDORES SOLARES DE UN EJE HORIZONTAL

La superficie en este tipo de seguidores gira respecto a un eje horizontal. El giro se programa de tal manera que la normal a la superficie coincida en todo momento con el meridiano terrestre que contiene al Sol. Esta clase de seguidores son más efectivos en latitudes bajas y medias (Abella, 2015).



Ilustración 12-Eje de rotación del seguidor solar de un eje horizontal.

Fuente: (solarchoice, 2017)

C) SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CON SEGUIDORES SOLARES DE UN EJE VERTICALES

El eje de rotación de este tipo de seguidores solares es vertical respecto al suelo. Esta clase de seguidores solares son más efectivos en latitudes altas que los seguidores de un eje horizontal (sotysolar, 2018).



Ilustración 13-Eje de rotación del seguidor solar de un eje vertical.

Fuente: (solarchoice, 2017)

D) SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CON SEGUIDORES SOLARES DE DOS EJES

Estos seguidores se mueven en dos ejes, uno alineado norte-sur y otro este-oeste de manera que buscan mantener la superficie de los paneles solares lo más perpendicular posible al sol. Si la instalación se realiza en zonas de alta latitud donde la posición del sol varía drásticamente entre los meses de invierno y verano este tipo de seguidores puede maximizar la producción en comparación al resto de seguidores solares (greenenergylatinamerica, 2019).



Ilustración 14-Movimientos del seguidor solar de dos ejes.

Fuente: (solarchoice, 2017)

3.3 CONCEPTUALIZACIÓN DE VARIABLES DE INVESTIGACIÓN

En este apartado se mostrarán todas las variables involucradas en este estudio, el rol que desempeñan cada una de las variables independientes y su efecto en la variable dependiente.

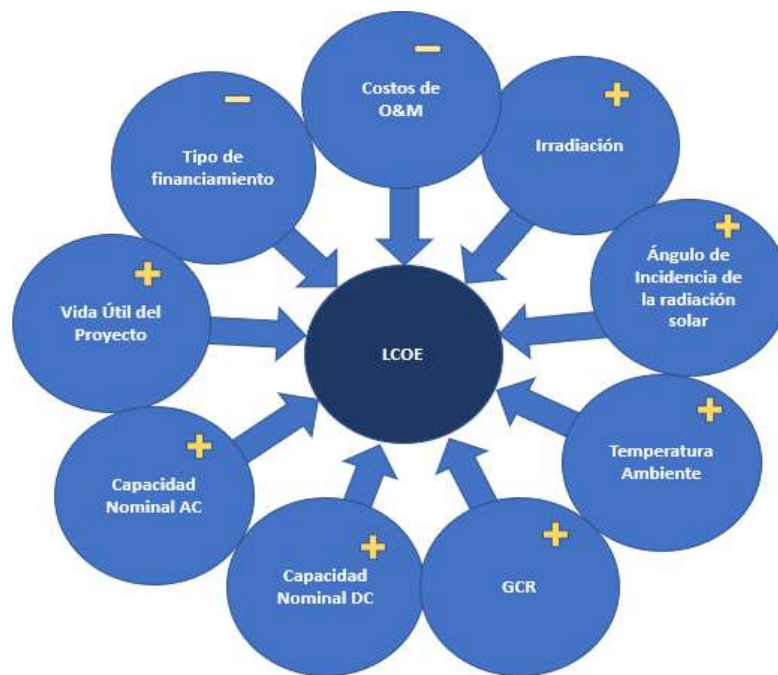


Ilustración 15-Efecto de variables independientes en la variable dependiente.

Fuente: Elaboración propia

3.3.1 VARIABLE DEPENDIENTE

Esta variable refleja los cambios en el entorno bajo estudio de esta investigación, sobre esta variable influyen las variables independientes.

A) LCOE (LEVELIZED COST OF ELECTRICITY)

El costo nivelado de la electricidad es una relación de los costos y la producción de energía a lo largo de toda la vida útil. Sirve para calcular el valor presente del costo total de construcción y operación de una planta de energía durante una supuesta vida útil.

Esta variable indica lo que cuesta producir un kWh para las diferentes tecnologías de conversión y está basada en la siguiente fórmula:

$$LCOE = \sum_{i=1}^{25} \frac{CC_i [\text{\$}] + O\&M_i [\text{\$}] + Fuel\ Cost_i [\text{\$}]}{Energía_i [kWh]}$$

Ecuación 1-Cálculo simple del costo nivelado de la electricidad

Fuente: (Ragheb, 2017).

3.3.2 VARIABLES INDEPENDIENTES

Son todas aquellas variables que se utilizan para evaluar, medir y manipular la investigación y también conocer el efecto o impacto hacia la variable dependiente.

En este apartado se detallan las variables independientes que tienen algún efecto en la variable dependiente.

A) TIPO DE FINANCIAMIENTO DE LA INVERSIÓN INICIAL

Según (Urbina, 2006) la inversión inicial comprende la adquisición de todos los activos fijos o tangibles y diferidos o intangibles necesarios para iniciar las operaciones de cualquier empresa (p. 173).

Existen dos formas de cubrir el costo de la inversión inicial: Con financiamiento, donde se solicita un préstamo para cubrir parte de la inversión y el resto lo cubre el inversionista, y sin financiamiento, donde toda la inversión es cubierta por el inversionista.

B) COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

Esta clase de costos involucran la mano de obra, materiales, mantenimiento de la maquinaria y todas aquellas erogaciones asociadas al funcionamiento y continuidad de una actividad (Mamani, 2009).

D) CAPACIDAD NOMINAL DC

La capacidad nominal DC se refiere a la potencia total instalada de módulos solares, y se obtiene multiplicando la potencia nominal de cada módulo por la cantidad de módulos.

E) CAPACIDAD NOMINAL AC

La capacidad nominal AC se refiere a la potencia total de los inversores, y se obtiene multiplicando la potencia nominal de cada inversor por la cantidad de inversores.

A la relación entre la capacidad nominal DC y la capacidad nominal AC se le denomina ratio DC/AC, en un escenario ideal este valor sería igual a 1, pero usualmente los módulos solares no alcanzan su capacidad nominal debido a que esta potencia procede ciertas condiciones estándar de prueba, *STC* (por sus siglas en inglés), bajo las cuales se prueba generalmente un módulo en un laboratorio y en la mayoría de lugares donde se instalan no se mantienen esas condiciones siempre. La fórmula para calcular el Ratio DC/AC es la siguiente:

$$\text{Ratio} \frac{DC}{AC} = \frac{P_{DC}[kW]}{P_{AC}[kW]}$$

Ecuación 2-Ratio DC/AC

Fuente: (solaredge, 2016).

G) IRRADIACIÓN SOLAR

La Irradiación solar [kWh/m²], es la magnitud que mide la energía por unidad de área de radiación solar incidente en una superficie colocada en un lugar y rango de tiempo bien especificados (solar energía, 2009).

H) TEMPERATURA AMBIENTE

La temperatura desempeña un rol sumamente importante en la producción de electricidad en instalaciones fotovoltaicas. Se estima que a 40 °C el rendimiento del panel solar suele disminuir un 20% (cambioenergético, 2017).

I) GCR (GROUND COVERAGE RATIO)

El factor de ocupación del suelo, GCR (por sus siglas en Inglés), es una relación entre el área ocupada por los módulos solares y el área total donde están distribuidos los módulos solares.

Tabla 1- Porcentaje de GCR ideal según tipo de sistema fotovoltaico.

GCR para Sistemas FV	
Estructura fija	50%
Seguidor de un eje	33%
Seguidor de dos ejes	25%

Fuente: (solarpowerworld, 2013).

J) ÁNGULO DE INCIDENCIA DE LA RADIACIÓN SOLAR

Es el ángulo que existe entre los rayos solares y la perpendicular al plano del generador.

Los módulos solares pueden ocupar cualquier posición sobre la superficie terrestre, por lo que el ángulo de incidencia puede variar. Los factores de los cuales depende este ángulo son:

Declinación: Es el ángulo que forma el sol con el plano del ecuador terrestre. Debido a la inclinación del eje de la tierra, la inclinación del plano del ecuador con respecto al sol varía a lo largo del año y a eso se deben las estaciones del año y las diferencias de duración del día (astrocole, 2018).

Latitud Geográfica: Es la distancia que existe desde un punto de la superficie terrestre al ecuador.

Longitud Geográfica: Es la distancia que existe desde un punto de la superficie terrestre al Meridiano de Greenwich.

Inclinación de los módulos fotovoltaicos: Es el ángulo que se forma producto de la inclinación de los módulos solares respecto al suelo. Para calcular la inclinación óptima es sistemas fotovoltaicos fijos en función de la latitud existe la siguiente fórmula:

$$\beta_{opt} = 3,7 + 0,69 \cdot |\phi|$$

Ecuación 3-Fórmula para calcular la inclinación óptima de módulos solares.

Fuente: (Pedro García, 2016).

Azimuth de los módulos solares: Es el ángulo formado por el eje N-S y la proyección del vector normal del módulo.

Ángulo horario: Es el ángulo que indica el desplazamiento angular del sol sobre el plano de la trayectoria solar.

K) VIDA ÚTIL DEL PROYECTO

La vida útil es el tiempo o duración estimada del funcionamiento de un objeto o algún proyecto. En el caso particular de la energía solar fotovoltaica los fabricantes de paneles solares deben diseñarlos para soportar inclemencias meteorológicas. La vida útil de un panel solar por lo general es de 25 años, aunque con un buen mantenimiento pueden durar hasta 30 años. La potencia nominal de los paneles solares se degrada alrededor de 0.5% por año (damiasolar, 2019).

IV. METODOLOGÍA

En este apartado se presenta la metodología empleada para el desarrollo de esta investigación. Se muestran las herramientas y actividades realizadas para esta investigación.

4.1 ENFOQUE

La metodología empleada en esta investigación posee un enfoque cuantitativo ya que utiliza la recolección de datos para probar hipótesis, con base en la medición numérica y el análisis estadístico.

4.2 VARIABLES DE INVESTIGACIÓN

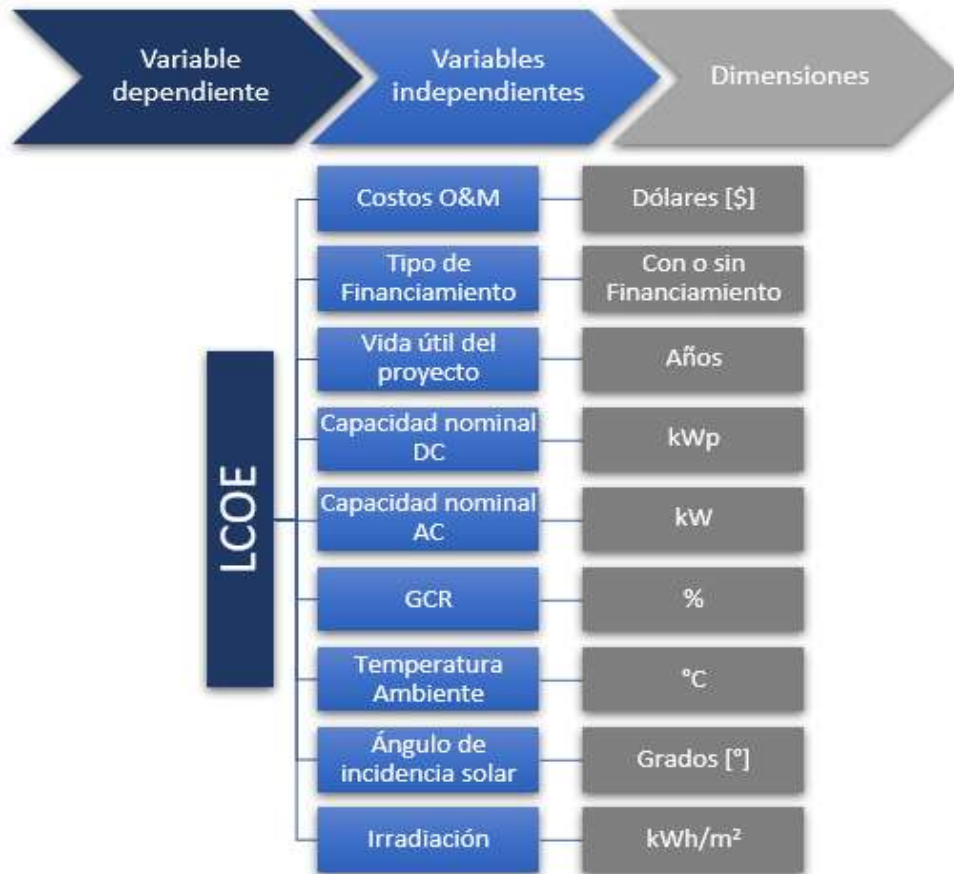


Ilustración 16-Dimensiones de las variables independientes

Fuente: Elaboración propia.

En la ilustración 16 se pueden observar las dimensiones de todas las variables involucradas en la investigación.

El *LCOE* es la variable dependiente, siendo afectada por todas las variables independientes que tienen relación con los costos asociados a la inversión inicial, operación, mantenimiento y además con la electricidad generada. Todos estos valores varían según el tipo de sistema fotovoltaico. Los costos de inversión inicial son mayores en sistemas fotovoltaicos con seguidores solares que en sistemas con estructura fija, lo mismo sucede con los costos asociados a la operación y mantenimiento de dichos sistemas.

La irradiación solar y la temperatura ambiente son factores atmosféricos fundamentales de los que depende en gran medida la generación de electricidad.

El aprovechamiento del recurso solar también varía en función del sistema fotovoltaico, aunque la irradiación solar y la temperatura ambiente sean la misma en un determinado lugar, el ángulo de incidencia en los módulos fotovoltaicos es distinto para cada sistema fotovoltaico, ya que los sistemas con estructura fija permanecen estáticos con una inclinación y azimuth establecidos, mientras tanto los sistemas con seguidores solares tienen uno o dos grados de libertad dependiendo del tipo de eje de rotación que tengan.

Un aspecto muy importante y que tiene una relación directa en la generación de electricidad es el GCR, ya que éste varía según el tipo de sistema fotovoltaico para evitar crear sombras entre los módulos.

La generación de electricidad se ve directamente afectada por las capacidades DC y AC del sistema fotovoltaico, ya que entre mayores sean, mayor será la generación de electricidad. De igual manera entre más vida útil tenga el sistema, mayor cantidad de electricidad generará.

4.3 HIPÓTESIS

A continuación, se presentan las hipótesis correlacionales de la investigación, con el fin de determinar si es factible técnica y económicamente la implementación de sistemas fotovoltaicos con seguidores solares en el Valle de Sula.

H₁: Los sistemas fotovoltaicos con estructura fija son los más viables técnica y económicamente en el Valle de Sula, tal que su *LCOE* es menor que el de los sistemas con seguidores solares de un eje horizontal y dos ejes.

H₂: Los sistemas fotovoltaicos con seguidores de un eje horizontal son los más viables técnica y económicamente en el Valle de Sula, tal que su *LCOE* es menor que el de los sistemas con estructura fija y seguidores solares de dos ejes.

H₃: Los sistemas fotovoltaicos con seguidores de dos ejes son los más viables técnica y económicamente en el Valle de Sula, tal que su *LCOE* es menor que el de los sistemas con estructura fija y seguidores solares de un eje horizontal.

4.4. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS APLICADOS

Para el desarrollo de la presente investigación se recopila información correspondiente al tema de la investigación mediante diversos artículos, libros y sitios en internet.

Para lograr determinar qué sistemas fotovoltaicos es más conveniente implementar en el Valle de Sula, se utiliza el *LCOE* como un parámetro que permite comparar todos los sistemas fotovoltaicos involucrados en esta investigación.

Es necesaria la utilización de programas capaces de simular sistemas fotovoltaicos y que proporcionen información útil para el análisis tecno-económico.

La principal herramienta empleada en esta investigación es PVsyst, este programa nos permitirá desarrollar las simulaciones de los sistemas fotovoltaicos con seguidores solares y con estructura fija y obtener la producción de electricidad anual de cada sistema. Para la obtención de los datos meteorológicos de cada lugar donde se desarrollarán las simulaciones se utilizará Meteonorm, ya que es una base de datos que proporciona acceso al historial meteorológico de diversos lugares.

Para el análisis financiero se utilizó Excel como software ya que al ser una hoja de cálculo permite trabajar con todos los datos numéricos involucrados en dicho análisis.

4.5 POBLACIÓN Y MUESTRA

Esta investigación está centrada en el Valle de Sula, una región ubicada en el norte de Honduras compuesta por 18 municipios, tal y como se muestra en la ilustración 17.

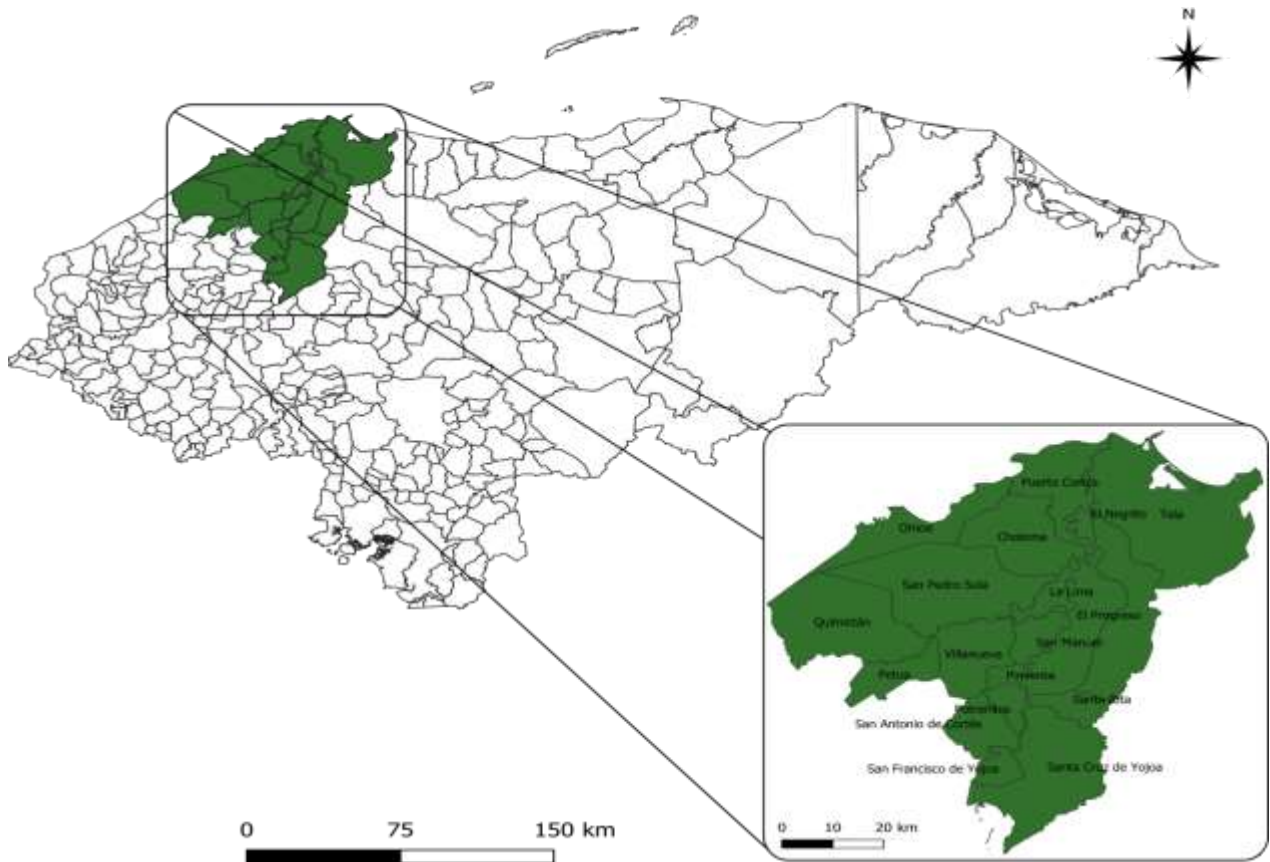


Ilustración 17-Mapa del Valle de Sula

Fuente: Elaboración propia.

4.6 METODOLOGÍA DE ESTUDIO

En este apartado se describen todos aquellos procedimientos, técnicas, instrumentos y actividades utilizadas y cómo se analizarán los datos.

4.6.1 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

La investigación consiste en comparar sistemas fotovoltaicos con estructura fija y con seguidores solares en el Valle de Sula. Esta región comprende 18 municipios, por lo tanto, las simulaciones de cada sistema se desarrollarán en cada uno de esos municipios.

Los sistemas fotovoltaicos involucrados en esta investigación son: Sistema fotovoltaico con estructura fija (a ser usado como referencia), con seguidor de un eje horizontal y con seguidor de dos ejes. Para estos sistemas se calculará el *LCOE*, de esta manera se podrá comparar los sistemas. Si el *LCOE* de los sistemas fotovoltaicos con seguidores solares es menor que el del sistema con estructura fija entonces, se comprobará la hipótesis de investigación. Para calcular el *LCOE* según la Ecuación 1, ubicada en el capítulo 3, es necesario conocer el costo de capital, costo de O&M, el costo de combustible (no se considera ya que la energía solar fotovoltaica no utiliza ningún combustible para su operación) y además determinar la electricidad generada por cada sistema a lo largo de toda la vida útil. En el caso del sistema con estructura fija, la inclinación se determinó a partir de la Ecuación 3. El azimuth seleccionado fue hacia el sur, ya que el Valle de Sula se encuentra en el hemisferio norte y de esta manera se puede obtener un mayor aprovechamiento del recurso solar mediante esta orientación.

Los límites de inclinación de los sistemas fotovoltaicos con seguidores solares fueron seleccionados a partir de las hojas técnicas de los fabricantes, en el caso del sistema con seguidor de un eje horizontal los límites de inclinación son desde -60° hasta 60° , mientras tanto para el caso del sistema con seguidor de dos ejes los límites de inclinación son desde 0° hasta 60° en eje horizontal y desde -135° hasta 135° en eje vertical.

Se utilizaron 37,680 módulos solares monofaciales de tipo monocristalino, marca Sun Power, modelo X21-345-COM, de 345 W. También se utilizaron 100 inversores marca Fronius AGILO 100.0-3 de 100 kW. Tanto el tipo de módulo como el inversor solar fueron seleccionados a partir de una matriz de decisión que permite evaluar varias opciones del mercado y elegir la más conveniente.

Otro aspecto importante para lograr comparar de manera equitativa todos los sistemas involucrados es mediante la relación de cobertura del suelo (*GCR* por sus siglas en inglés) adecuada según el tipo de instalación, esto con la finalidad de evitar las sombras entre los mismos módulos solares. En el caso del sistema con estructura fija se utilizó un *GCR* del 50%, para el sistema con seguidor de eje horizontal se utilizó un 33% y en el caso del sistema con dos ejes un *GCR* del 25%.

Para realizar una comparación equitativa, las capacidades DC y AC son las mismas para todos los sistemas fotovoltaicos involucrados en esta investigación, siendo éstas las siguientes: 13 MWp y 10 MWac, utilizando de esta manera un ratio DC/AC igual a 1.3, ya que 10 MWac es un valor representativo de la potencia instalada en sistemas fotovoltaicos sobre suelo que existen en la actualidad para esta región.

4.6.2 BÚSQUEDA DE INFORMACIÓN

Al comienzo de la investigación se realizó la búsqueda de información necesaria para desarrollar un análisis de la situación actual, a niveles de macro-entorno y micro-entorno, posteriormente se recopilaron teorías que sustentan nuestra investigación y por último se conceptualizaron diversos elementos involucrados en esta investigación.

4.6.3 DETERMINACIÓN DE VARIABLES DE INVESTIGACIÓN

Para continuar con el desarrollo de la investigación, es necesario determinar la variable dependiente y las variables independientes que tienen algún grado de afectación sobre esa variable dependiente. Como variable dependiente se eligió al *LCOE*, ya que mediante este parámetro se logrará determinar cuál sistema fotovoltaico es más viable desde un punto de vista técnico y económico en la región del Valle de Sula. Como variables independientes se eligieron las siguientes: Costos O&M, Tipo de financiamiento, Irradiación solar, Temperatura ambiente, *GCR*, Ángulo de incidencia de la radiación solar, Vida útil del proyecto, Capacidad nominal DC y Capacidad nominal AC. En base a todas estas variables se presentarán los análisis y resultados.

4.6.4 SIMULACIONES EN PVSYSY

Habiendo seleccionado todo lo descrito anteriormente, se procede a realizar las simulaciones mediante PVsyst. Dentro de los objetivos específicos se encuentra el descubrir la electricidad generada de cada sistema fotovoltaico en el Valle de Sula, ya que esto nos permitirá evaluar el incremento de la producción de electricidad mediante sistemas con seguidores solares.

4.6.5 ANÁLISIS TECNO-ECONÓMICO

Después de haber realizado las simulaciones y obtenido la producción de electricidad anual en cada lugar, se procede a desarrollar un análisis tecno-económico, considerando toda la vida útil del proyecto y a su vez tomando en consideración el factor de degradación de los sistemas fotovoltaicos y la tasa de inflación. Se desarrollaron dos distintos escenarios para el tipo de financiamiento de la inversión inicial: Con financiamiento y sin financiamiento. En ambos escenarios se consideran los costos de inversión inicial y costos de O&M según cada sistema fotovoltaico, para el escenario con financiamiento el capital procede en un 70% mediante un préstamo y el restante 30% de la contribución del inversionista. Mientras tanto, para el caso sin financiamiento la totalidad de la inversión procede del inversionista. Además dentro de estos dos escenarios anteriormente descritos, se harán dos consideraciones: Incluyendo el valor del terreno y sin incluir el valor del terreno.

4.6.6 LIMITANTES DE LA INVESTIGACIÓN

La principal limitación de esta investigación es que solamente una región de la zona norte de Honduras fue seleccionada como área de estudio. Este trabajo investigativo está enfocado en la comparación de los sistemas fotovoltaicos con seguidores solares y con estructura fija únicamente sobre suelo. La comparación de estos sistemas es mediante los costos de producción de electricidad, limitando el involucramiento de precios de venta.

4.7 CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

En la tabla 2 se presentan las actividades desarrolladas para la elaboración de este trabajo de investigación.

Tabla 2- Cronograma de Actividades

Actividades para la elaboración del Proyecto de Investigación	Semanas									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Introducción	■									
Planteamiento del problema		■								
Marco teórico		■	■							
Metodología				■						
Simulaciones PVsyst		■	■	■	■	■	■			
Análisis Tecno-económico					■	■	■			
Análisis de sensibilidad							■			
Resultados y Análisis							■			
Conclusiones							■			
Recomendaciones							■			
Aplicabilidad/ Implementación								■	■	
Evolución de trabajo actual/ trabajo futuro								■	■	
Bibliografía				■						
Anexos									■	
Informe final										■
Pre-defensa										■

Fuente: Elaboración propia.

V. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este apartado se muestran los resultados obtenidos de las simulaciones y del análisis tecno-económico.

5.1 GENERACIÓN ANUAL DE ELECTRICIDAD

Para lograr determinar la generación anual de electricidad de cada sistema fotovoltaico en todos los municipios del Valle de Sula, es necesario determinar las especificaciones técnicas de cada sistema, tal y como puede observarse en la Tabla 3.

Tabla 3-Especificaciones Técnicas de los Sistemas Fotovoltaicos

Sistema FV	Capacidad Nominal DC	Capacidad Nominal AC	GCR	Inclinación	Azimuth	Límites de Inclinación
Estructura Fija (Referencia)	13 MWp	10 MWac	50%	14°	0° (Sur)	No aplica
Seguidor de un eje horizontal	13 MWp	10 MWac	33%	No aplica	No aplica	Desde -60° hasta 60°
Seguidor de Dos ejes	13 MWp	10 MWac	25%	No aplica	No aplica	Desde -135° hasta 135° en eje vertical Desde 0° hasta 60° en eje horizontal

Fuente: Elaboración propia.

En las tablas 4 y 5 se muestra la matriz de decisión para determinar el módulo fotovoltaico y el inversor solar a utilizar, asignando una calificación desde 1 hasta 10 para cada uno de los criterios de evaluación y seleccionando el de mayor calificación final.

Tabla 4-Matriz de decisión para módulo fotovoltaico

Variables	SunPower		Panasonic		Aleo Solar	
Modelo	SPR-X21-345-COM		VBHN325SJ47		Aleo X59	
Potencia [W]	9	345	8	325	7	310
Wattios/m ²	10	214	9	194	7	184
Precio [\$]	7	415	9	305	8	385
Eficiencia	9	21.5%	8	19.7%	8	18.9%
Total Ponderado	35		34		30	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5-Matriz de decisión para inversor solar

Variables	Fronius		ABB		SMA	
Modelo	AGILO 100.0-3		PVS-100-TL		SUNNY TRIPOWER	
Precio [\$]	7	14,182	9	7,707	8	9,949
Garantía [años]	9	7	7	5	7	5
Solidez de la empresa	10	Excelente	8	Muy buena	8	Muy buena
Eficiencia	8	97.2%	9	98.2%	9	98.1%
Total Ponderado	34		33		33	

Fuente: Elaboración propia.

Las simulaciones en PVsyst permiten calcular la generación de electricidad para cada municipio del Valle de Sula de acuerdo con las especificaciones técnicas de cada uno de los sistemas fotovoltaicos involucrados en esta investigación.

En la Ilustración 18 se puede apreciar la generación anual de electricidad de cada sistema fotovoltaico en todos los municipios del Valle de Sula.

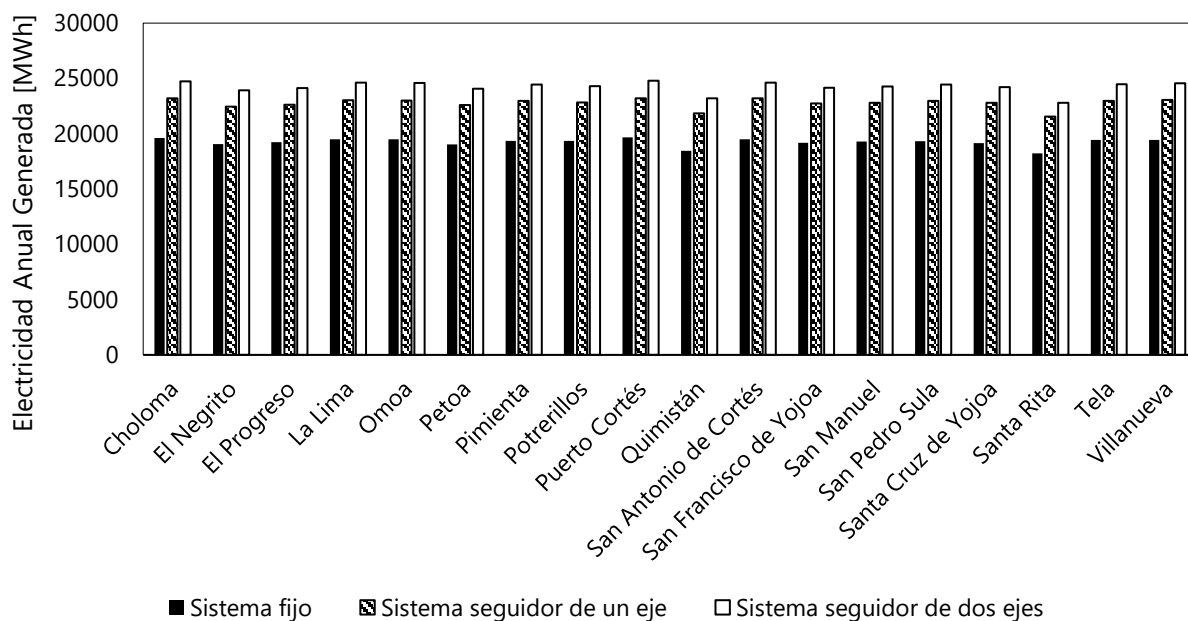


Ilustración 18-Generación Anual de Electricidad para el primer año en el Valle de Sula

Fuente: Elaboración propia.

El promedio de generación de electricidad para el primer año en el Valle de Sula con el sistema de estructura fija es de 19,241 MWh, mientras tanto para el sistema con seguidor de un eje horizontal es de 22,766 MWh, lo que representa un incremento de 18.32% en relación con el sistema con estructura fija. Por otra parte, el sistema con seguidor de dos ejes tiene una generación anual de electricidad en promedio de 24,242 MWh, lo que representa un incremento de aproximadamente un 26% en comparación al sistema con estructura fija.

5.2 COSTOS DE INVERSIÓN INICIAL, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

Los costos de inversión inicial, operación y mantenimiento son fundamentales para determinar qué clase de sistema fotovoltaico cuenta con un LCOE más bajo.

Según (Ran Fu, 2018), el costo específico de capital para un sistema fotovoltaico con seguidor de un eje horizontal es mayor en un 8% en relación a un sistema con estructura fija, sin considerar el valor del terreno, mientras tanto los costos de O&M anual de los sistemas con seguidor de un eje y con estructura fija, considerando el reemplazo de inversores entre el año 10 y 13 del proyecto, son de 14\$/kWp y 13\$/kWp respectivamente.

Por otra parte, el costo específico de capital para un sistema fotovoltaico con seguidor de dos ejes es mayor en un 18% en relación con un sistema con estructura fija, sin considerar el valor del terreno (allearthsolar, 2016).

Los costos de O&M en los sistemas con seguidores de dos ejes es un 25% mayor en relación con los costos de O&M para sistemas con estructura fija (Jose Simon, 2013).

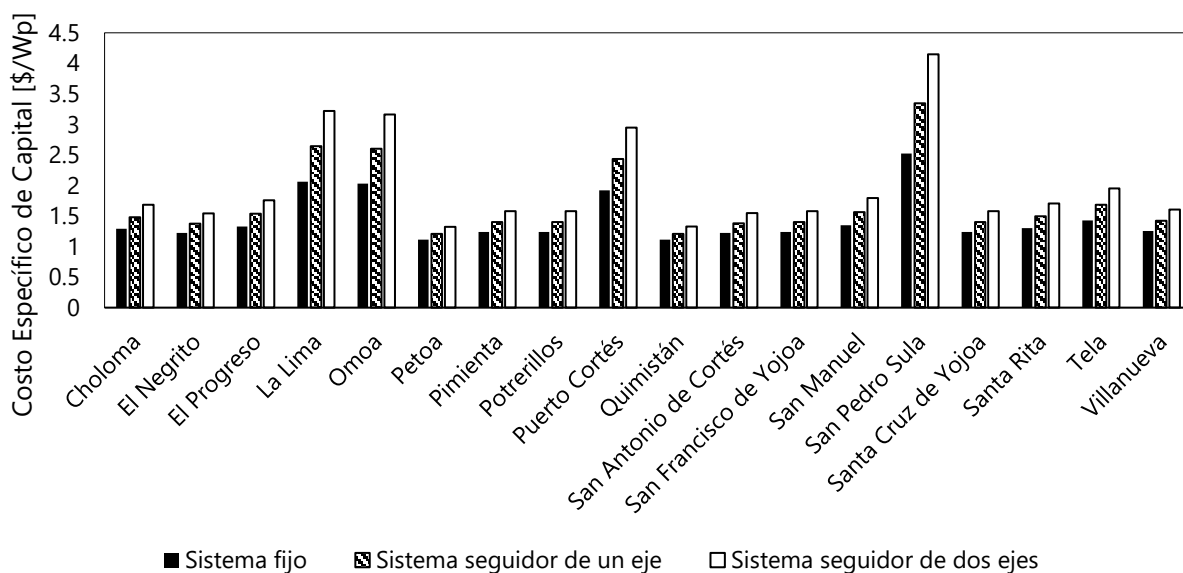


Ilustración 19-Costos Específicos de Capital en el Valle de Sula.

Fuente: Elaboración propia.

En la Ilustración 19 se muestran los costos específicos de capital de cada sistema fotovoltaico, considerando el valor del terreno, en todos los municipios del Valle de Sula. El

promedio del costo específico de capital en el Valle de Sula para el sistema con estructura fija es de 1.45\$/Wp. Mientras tanto en el caso del sistema con seguidor de un eje es de 1.72\$/Wp, lo que representa un incremento del 18.62% en relación con el sistema con estructura fija.

Por otra parte, el sistema con seguidor de dos ejes tiene en promedio un costo específico de capital de 2\$/Wp, lo que representa un incremento del 37.93% en relación con el sistema con estructura fija.

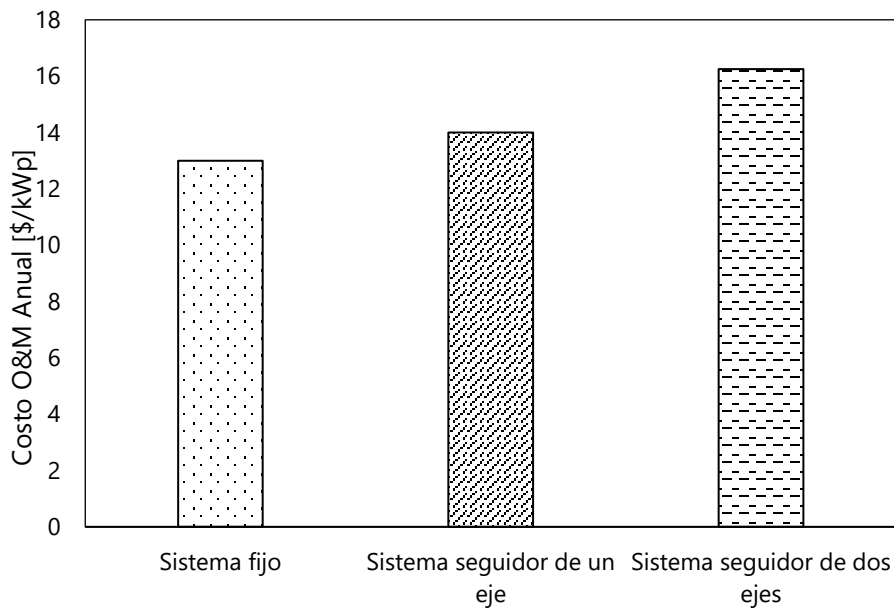


Ilustración 20- Costos de Operación y Mantenimiento Anual de los Sistemas Fotovoltaicos.

Fuente: Elaboración propia.

En la Ilustración 20 se aprecia claramente que los sistemas con seguidores solares tienen un costo de O&M mayor al del sistema con estructura fija. La diferencia entre el sistema con seguidor de un eje y el sistema con estructura fija es de 7.69%, mientras tanto la diferencia entre el sistema con seguidor de dos ejes y el sistema con estructura fija es de 25%. Esta diferencia se debe principalmente a que los sistemas fotovoltaicos con seguidores solares poseen un costo de O&M mayor a los sistemas con estructura fija debido a que el mantenimiento requerido incluye motores, sensores y partes móviles que los sistemas con estructura fija no utilizan.

5.3 COSTO DE TERRENO Y COBERTURA DEL SUELO

El costo de un terreno varía en función de la ubicación y las condiciones de este. En el Valle de Sula existen diversos valores dentro de un mismo municipio.

Tabla 6-Precio del Metro Cuadrado en municipios del Valle de Sula

Municipio	Precio [\$/m²]
Choloma	19.89
El Negrito	12.59
El Progreso	23.75
La Lima	100.16
Omoa	97.30
Petoa	0.89
Pimienta	14.31
Potrerrillos	14.31
Puerto Cortés	85.85
Quimistán	1.14
San Antonio de Cortés	12.88
San Francisco de Yojoa	14.31
San Manuel	25.75
San Pedro Sula	148.81
Santa Cruz de Yojoa	14.31
Santa Rita	21.03
Tela	33.77
Villanueva	15.74

Fuente: Elaboración propia a partir de (Castro, 2020).

La distribución de los módulos fotovoltaicos es sumamente importante para evitar las sombras entre ellos mismos, es por esto que el GCR permite determinar la relación de cobertura del suelo entre el área cubierta por los módulos fotovoltaicos y el área total del montaje. El GCR depende del tipo de sistema fotovoltaico, tal y como se muestra en la Tabla 1.

El área cubierta por los 37,680 módulos fotovoltaicos es de 61,447 m², por tanto, la extensión territorial de cada sistema fotovoltaico, considerando el GCR adecuado, queda determinada de acuerdo con la Ilustración 21.

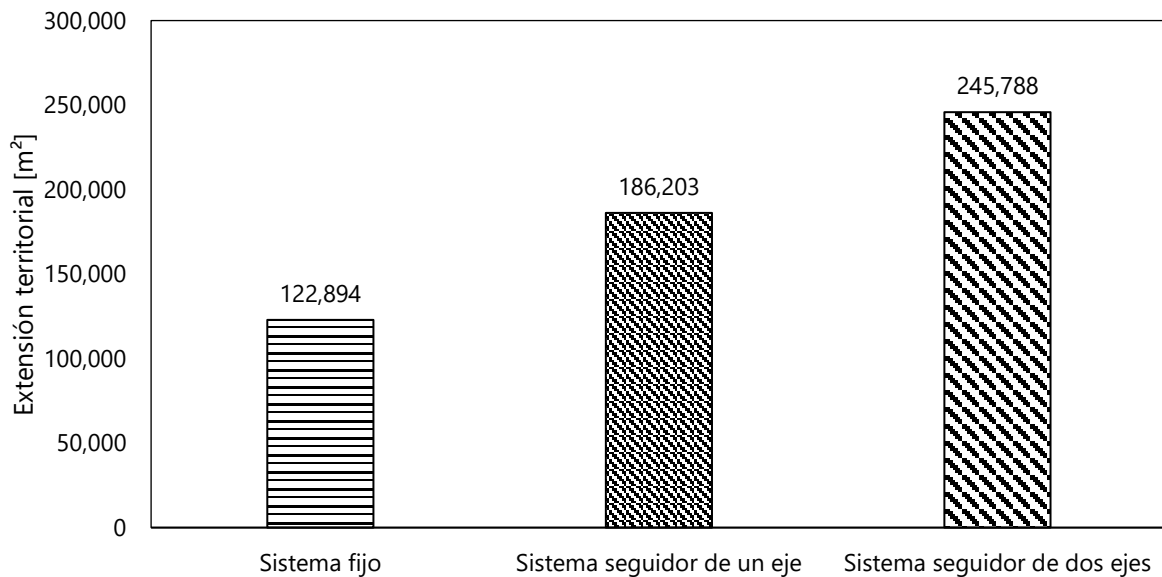


Ilustración 21- Cobertura del Suelo de cada Sistema Fotovoltaico.

Fuente: Elaboración propia.

5.4 COSTO NIVELADO DE LA ELECTRICIDAD (LCOE)

Para determinar el LCOE de cada sistema fotovoltaico en el Valle de Sula es necesario realizar un análisis tecno-económico que involucre diversos parámetros de entrada, tal y como se muestra en la Tabla 7.

El cálculo del LCOE comprende dos escenarios: con financiamiento y sin financiamiento, y a su vez mediante dos consideraciones: incluyendo el valor del terreno y sin incluir el valor del terreno, además se desarrolla por cada tipo de sistema fotovoltaico: con estructura fija, con seguidor de un eje horizontal y con seguidor de dos ejes. Para lograr determinar qué sistema fotovoltaico cuenta con el LCOE más bajo es necesario desarrollar este cálculo para cada municipio del Valle de Sula.

Tabla 7-Parámetros de Entrada para el Análisis Tecno-Económico

Parámetros de Entrada Análisis Tecno-Económico	
Capacidad instalada [kWp]	13,000
Costo paneles solares [\$/W]	0.29
Costo inversores [\$/W]	0.16
Costo estructura [\$/W]	0.2
Costo BOS [\$/W]	0.11
Costo Obras civiles [\$/W]	0.19
Costo Línea de Transmisión [\$/W]	0.14
Costo Terreno [\$/m ²]	Según lugar
Costo Permiso de Construcción [% costo total de instalación]	1
Costo Permiso Ambiental [% costo total de instalación]	0.1
Extensión Terreno para Sistema FV Fijo [m ²]	122,894
Extensión Terreno para Sistema FV Seguidor un Eje [m ²]	186,203
Extensión Terreno para Sistema FV Seguidor Dos Ejes [m ²]	245,788
Costo O&M estructura fija [\$/kW] (anual)	13
Costo O&M seguidor de un eje horizontal [\$/kWp](anual)	14
Costo O&M seguidor de dos ejes [\$/kWp] (anual)	16.25
Seguros [% costo total de instalación]	0.75%
Tasa de Inflación Anual [%]	1.50%
Factor de degradación anual en paneles [%]	0.25%
Inversión fondos propios [%]	70%
Deuda [%]	30%
Tasa de intereses [%]	10%
Plazo de préstamo [años]	10
Ciclo de vida del proyecto [años]	25
CRF	0.16

Fuente: Elaboración propia.

5.4.1 LCOE SIN FINANCIAMIENTO Y CONSIDERANDO EL VALOR DEL TERRENO

Para este escenario se considera que todo el costo de inversión inicial proviene por parte del inversionista. Además, se considera el valor del terreno.

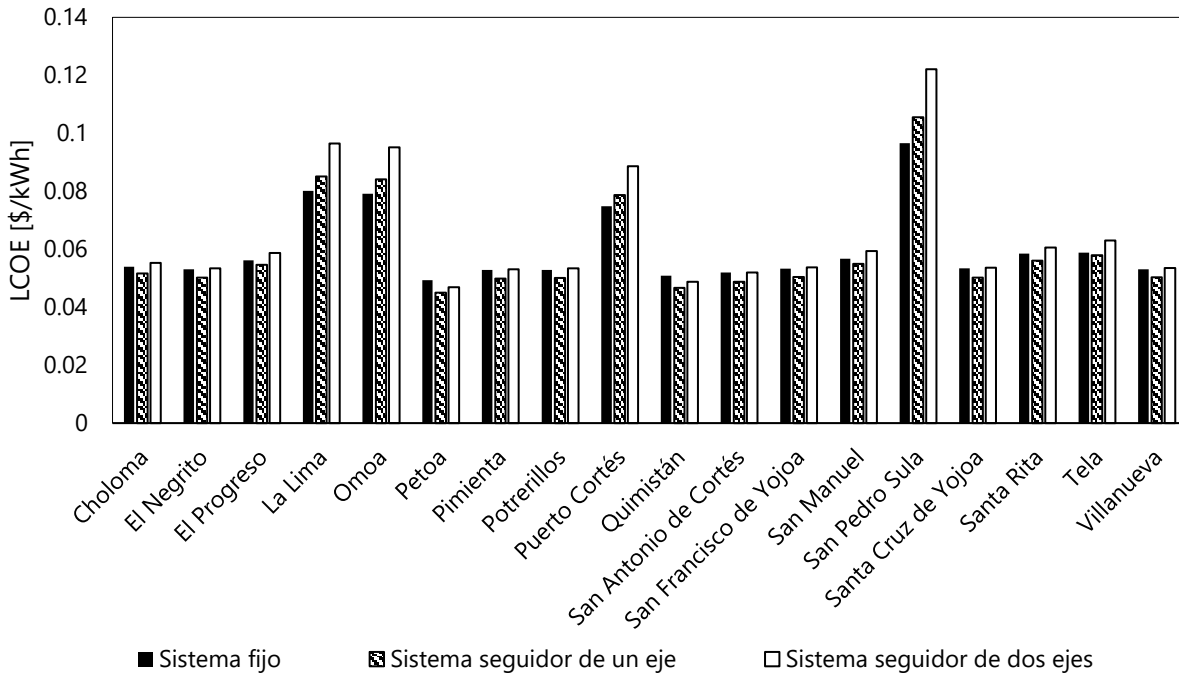


Ilustración 22-LCOE sin financiamiento y considerando el valor del terreno.

Fuente: Elaboración Propia.

En la Ilustración 22, se puede apreciar que en 14 municipios el LCOE más bajo lo presenta el sistema fotovoltaico con seguidor de un eje horizontal. Mientras tanto en el resto de los municipios (La Lima, Omoa, Puerto Cortés y San Pedro Sula) el LCOE más bajo lo presenta el sistema con estructura fija. Esto se debe a que en los municipios donde el valor del terreno es más elevado, la implementación de seguidores solares no es viable económicamente. Caso contrario en aquellos municipios donde el valor del terreno es más bajo, la implementación de esta clase de sistemas sí es viable económicamente.



Ilustración 23-LCOE de sistema fotovoltaico fijo en municipios del Valle de Sula

Fuente: Elaboración propia.

En la ilustración 23 se logra observar que 14 de los 18 municipios del Valle de Sula tienen un LCOE situado entre 0.05 \$/kWh y 0.06 \$/kWh. Mientras que en Puerto Cortés, Omoa y La Lima el LCOE se encuentra entre 0.07\$/kWh y 0.08\$/kWh. El municipio que presenta el valor de LCOE más elevado es San Pedro Sula con 0.097\$/kWh.

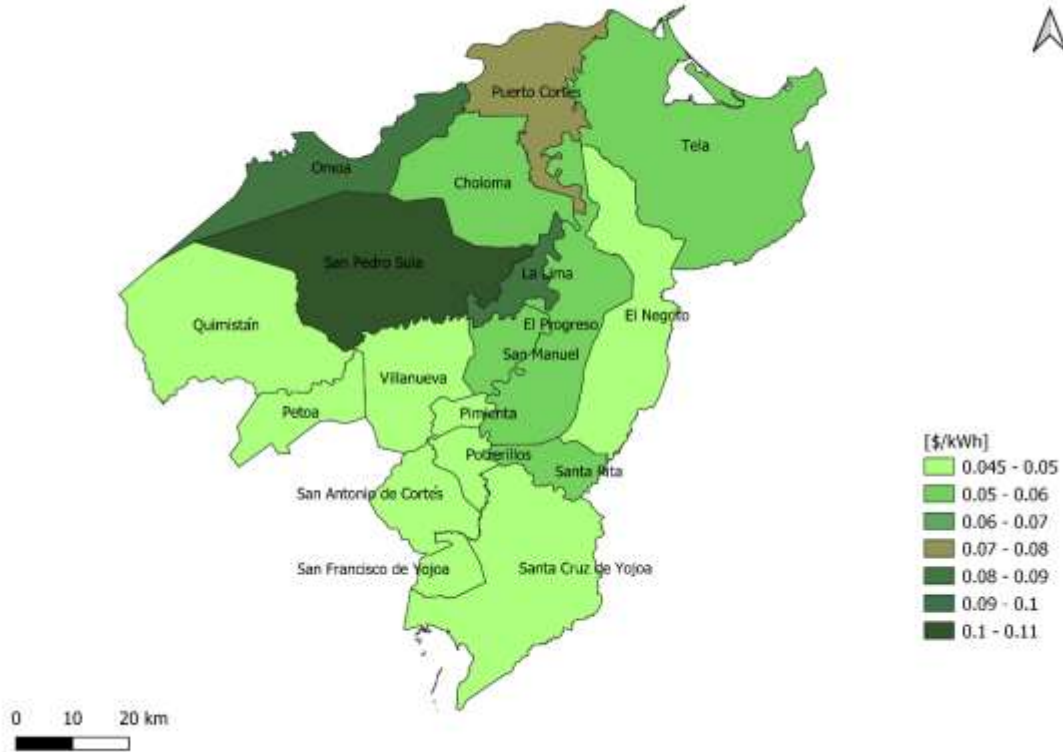


Ilustración 24-LCOE de sistema con seguidor de un eje en municipios del Valle de Sula

Fuente: Elaboración propia.

En la ilustración 24 se observa que 9 de los 18 municipios del Valle de Sula presentan un LCOE entre 0.045\$/kWh y 0.05\$/kWh. Por otra parte, Tela, Choloma, Santa Rita, San Manuel y El Progreso poseen un LCOE entre 0.05\$/kWh y 0.06\$/kWh. Puerto Cortés tiene un LCOE de 0.079\$/kWh, mientras tanto La Lima y Omoa poseen un LCOE entre 0.08\$/kWh y 0.09\$/kWh. Al igual que el sistema fijo, el municipio que presenta el LCOE más elevado es San Pedro Sula con 0.106\$/kWh.



Ilustración 25-LCOE de sistema con seguidor de dos ejes en municipios del Valle de Sula

Fuente: Elaboración propia.

La ilustración 25 muestra que para el sistema con seguidor de dos ejes los municipios que presentan los valores de LCOE más bajos son Quimistán y Petoa, ambos del departamento de Santa Bárbara, ubicándose entre 0.047\$/kWh y 0.05\$/kWh; esto se debe principalmente porque estos dos municipios a su vez presentan los valores de terreno más bajos entre todos los municipios que comprenden el Valle de Sula. Existen 10 municipios cuyos valores de LCOE se encuentran entre 0.05\$/kWh y 0.06\$/kWh. Santa Rita y Tela cuentan con valores de LCOE entre 0.06\$/kWh y 0.07\$/kWh, por otra parte, Puerto Cortés cuenta con un LCOE de 0.089\$/kWh. Los municipios de La Lima y Omoa poseen valores de LCOE situados entre 0.09\$/kWh y 0.1\$/kWh. El valor de LCOE más elevado en todo el Valle de Sula corresponde a San Pedro Sula con 0.122\$/kWh.

5.4.2 LCOE CON FINANCIAMIENTO Y CONSIDERANDO EL VALOR DEL TERRENO.

En este escenario se considera que el 70% del costo de inversión inicial proviene de un préstamo, cuyas características se muestran en la tabla 7, y que el restante 30% proviene por parte del inversionista. Además, se considera el valor del terreno.

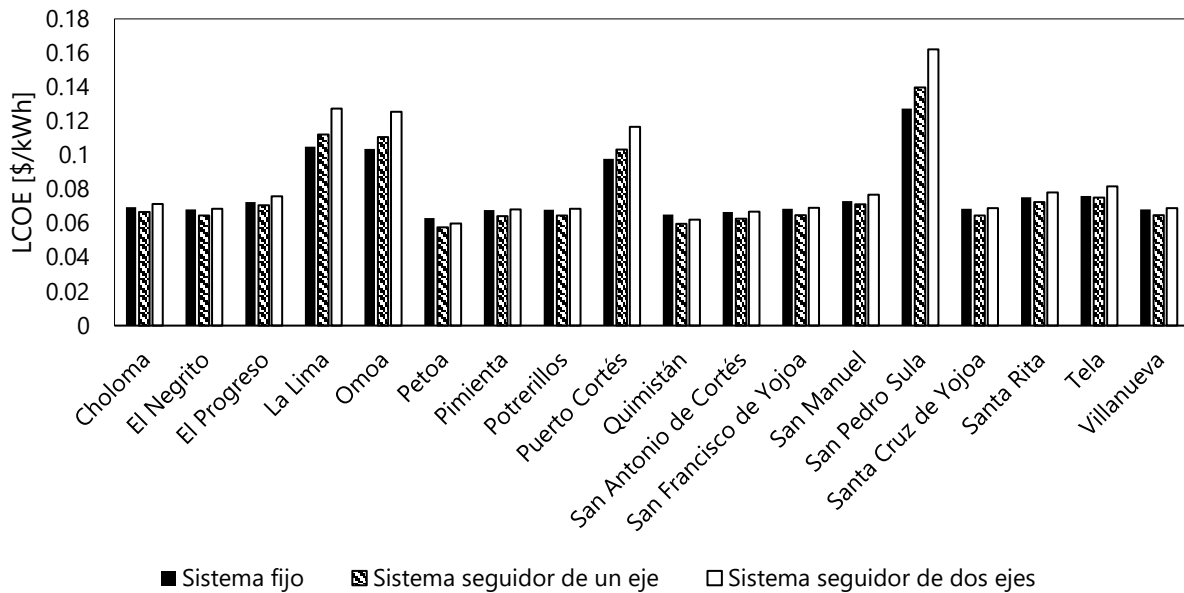


Ilustración 26-LCOE con financiamiento y considerando el valor del terreno.

Fuente: Elaboración propia.

El resultado mediante este escenario sigue la misma tendencia de los resultados del escenario anterior solamente que el valor del LCOE para cada sistema fotovoltaico se incrementa en aproximadamente un 30% en comparación al escenario anterior.

5.4.3 LCOE SIN FINANCIAMIENTO Y SIN CONSIDERAR EL VALOR DEL TERRENO

Este escenario aplica para todos aquellos proyectos que ya cuentan previamente con un terreno para el montaje de los módulos solares y cuyo financiamiento proviene en su totalidad por parte del inversionista.

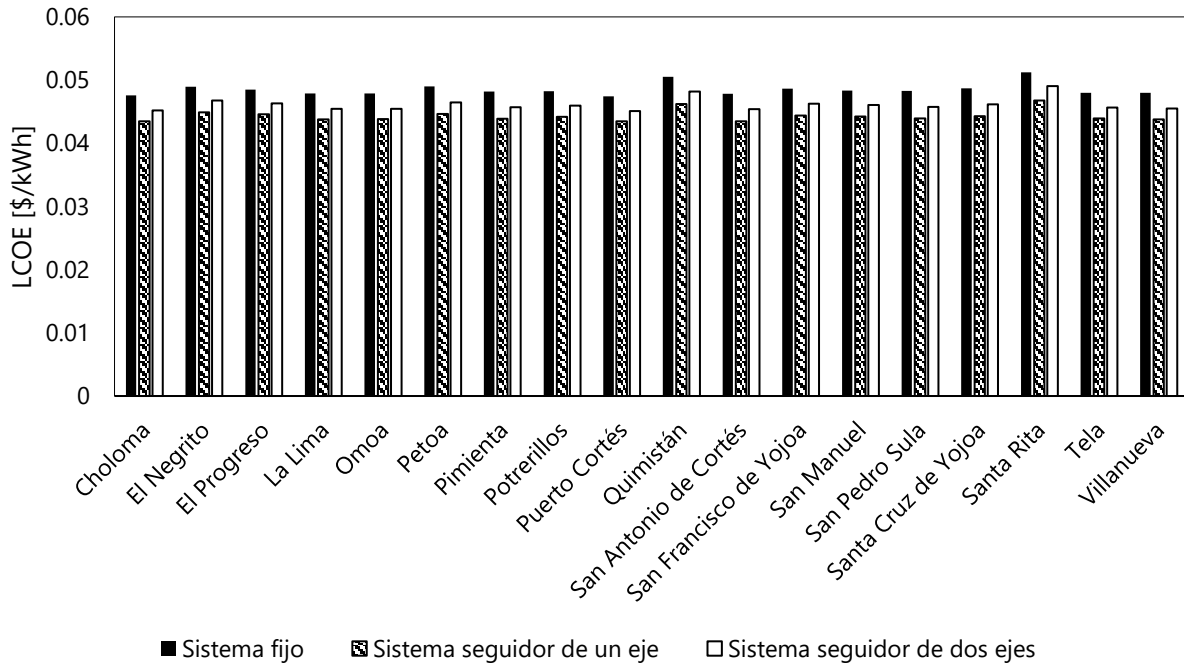


Ilustración 27-LCOE sin financiamiento y sin considerar el valor del terreno.

Fuente: Elaboración propia.

Tal y como se puede apreciar en la Ilustración 27, el comportamiento del valor del LCOE para los distintos sistemas fotovoltaicos es el mismo en todos los municipios del Valle de Sula, esto quiere decir que, si ya se cuenta previamente con un terreno, la mejor opción es el sistema con seguidor de un eje horizontal, luego el sistema con seguidor de dos ejes y por último el sistema con estructura fija.

5.4.4 LCOE CON FINANCIAMIENTO Y SIN CONSIDERAR EL VALOR DEL TERRENO

Este escenario aplica para aquellos proyectos cuyo financiamiento proviene en un 70% por parte de un préstamo y el restante 30% de la contribución del inversionista. Además, no se considera el valor del terreno.

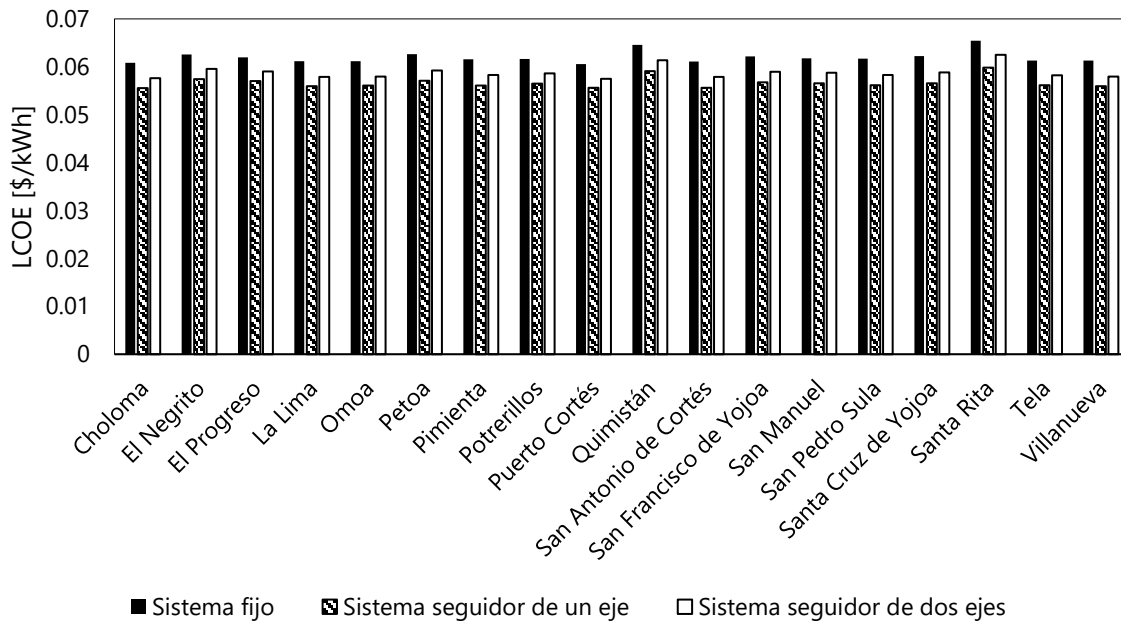


Ilustración 28-LCOE con financiamiento y sin considerar el valor del terreno.

Fuente: Elaboración propia.

El comportamiento en este escenario es el mismo que en el caso anterior, solamente que el valor del LCOE para cada sistema fotovoltaico se incrementa en aproximadamente un 28% en comparación al escenario anterior.

5.5 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Este análisis de sensibilidad evalúa la variación del LCOE según modificaciones del valor del terreno [\$/m²]. Esto permite saber a partir de qué precios de terreno se modifica el orden de los sistemas fotovoltaicos de acuerdo con el LCOE, basado en el promedio del Valle de Sula.

Tabla 8-Variación del LCOE sin financiamiento de acuerdo con el valor del terreno.

Valor del Terreno [\$/m ²]	LCOE Sistema con estructura fija [\$/kWh]	LCOE Sistema con seguidor un eje [\$/kWh]	LCOE Sistema con seguidor dos ejes [\$/kWh]
1-14	0.049 - 0.053	0.045 - 0.050	0.047 - 0.053
15-45	0.053 - 0.063	0.051 - 0.063	0.054 - 0.069
46 - en adelante	0.063 -	0.064 -	0.070 -

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 8 se muestra que cuando los rangos del valor de terreno varían desde 1-14\$/m², el sistema con el LCOE más bajo es el sistema con seguidor de un eje, luego el sistema con seguidor de dos ejes y por último el sistema con estructura fija, que en los 14\$/m² iguala al LCOE del sistema con seguidor de dos ejes. Este orden se modifica cuando el rango aumenta entre 13-45\$/m², ya que el sistema con seguidor de un eje continúa teniendo el LCOE más bajo, pero luego se encuentra el sistema con estructura fija, que iguala el valor del LCOE con el del sistema con seguidor de un eje en los 45\$/m² y en último puesto el sistema con seguidor de dos ejes. Desde los 46\$/m² en adelante, se mantiene el mismo orden de LCOE, siendo el sistema con estructura fija el que posee el LCOE más bajo, luego el sistema con seguidor de un eje y por último el sistema con seguidor de dos ejes.

Tabla 9-Variación del LCOE con financiamiento de acuerdo con el valor del terreno.

Valor del Terreno [\$/m²]	LCOE Sistema con estructura fija [\$/kWh]	LCOE Sistema con seguidor un eje [\$/kWh]	LCOE Sistema con seguidor dos ejes [\$/kWh]
1-13	0.062 - 0.068	0.057 - 0.064	0.059 - 0.068
14-43	0.068 - 0.081	0.065 - 0.081	0.069 - 0.089
44 - en adelante	0.081 -	0.082 -	0.090 -

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 9 se muestra que cuando los rangos del valor de terreno varían desde 1-13\$/m², el sistema con el LCOE más bajo es el sistema con seguidor de un eje, luego el sistema con seguidor de dos ejes y por último el sistema con estructura fija, que iguala el valor de LCOE del sistema con seguidor de dos ejes en los 13\$/m². Este orden se modifica cuando el rango aumenta entre 14-43\$/m², ya que el sistema con seguidor de un eje continúa teniendo el LCOE más bajo, pero luego se encuentra el sistema con estructura fija, que en los 43\$/m² iguala el mismo valor de LCOE que el sistema con seguidor de un eje y en último puesto el sistema con seguidor de dos ejes. Desde los 44\$/m² en adelante, se mantiene el mismo orden de LCOE, siendo el sistema con estructura fija el que posee el LCOE más bajo, luego el sistema con seguidor de un eje y por último el sistema con seguidor de dos ejes.

VI. CONCLUSIONES

La investigación presentada ha logrado determinar el sistema fotovoltaico más viable a partir del LCOE más bajo en todos los municipios que comprenden el Valle de Sula mediante una comparación tecno-económica entre los sistemas fotovoltaicos con seguidores solares y con estructura fija para una instalación de 10 MWac sobre suelo. La investigación reveló los siguientes resultados:

1 .Se acepta la segunda hipótesis correlacional (H_2) ya que el sistema más conveniente para una instalación fotovoltaica es el que cuenta con seguidor de un eje horizontal, debido a que posee el *LCOE* más bajo en 14 de los 18 municipios del Valle de Sula, con un valor promedio de 0.059\$/kWh en el escenario sin financiamiento y de 0.077\$/kWh para el escenario con financiamiento, luego el sistema con estructura fija posee el *LCOE* más bajo en el resto de los municipios (La Lima, Omoa, Puerto Cortés y San Pedro Sula) con un valor promedio de 0.060\$/kWh en el escenario sin financiamiento y de 0.078\$/kWh para el escenario con financiamiento y por último el sistema con seguidor de dos ejes con un valor promedio de 0.065\$/kWh en el escenario sin financiamiento y de 0.084\$/kWh para el escenario con financiamiento, considerando el valor del terreno.

2. El sistema con seguidor de un eje horizontal tiene un incremento en la generación de electricidad de 18.32% en relación con el sistema de estructura fija. Por otra parte, el sistema con seguidor de dos ejes tiene un incremento de aproximadamente un 26% en comparación al sistema con estructura fija.

3. El sistema con seguidor de un eje posee un costo específico de capital mayor en un 18.62% en relación con el sistema de estructura fija, considerando el valor del terreno. Por otra parte, el sistema con seguidor de dos ejes tiene un incremento del 37.93% en relación con el sistema con estructura fija.

4. El sistema con seguidor de un eje tiene un costo de O&M mayor en un 7.69%, en relación con el sistema de estructura fija, mientras tanto el sistema con seguidor de dos ejes cuenta con un costo de O&M superior en un 25% en comparación al sistema con estructura fija.

5. El área necesaria para el montaje del sistema fotovoltaico con estructura fija es de 122,894 m², mientras tanto para el sistema con seguidor de un eje, el área de montaje es de 186,203 m²; lo que representa un incremento de 51.5% en comparación al sistema de estructura fija. Por otra parte, el sistema dos ejes es de 245,788 m², lo que representa un incremento de 100%.

6. Si no se considera el valor de terreno, la mejor opción en los 18 municipios del Valle de Sula a partir del *LCOE* más bajo para una instalación fotovoltaica es el sistema con seguidor de un eje con un valor promedio de 0.044\$/kWh en el escenario sin financiamiento y de 0.056\$/kWh para el escenario con financiamiento, luego el sistema con seguidor de dos ejes con un valor promedio de 0.046\$/kWh en el escenario sin financiamiento y de 0.059\$/kWh para el escenario con financiamiento y por último el sistema con estructura fija que posee un valor promedio de 0.049\$/kWh en el escenario sin financiamiento y de 0.062\$/kWh para el escenario con financiamiento.

VII. RECOMENDACIONES

1. El Análisis Tecno-Económico muestra que, si ya se cuenta previamente con un terreno en alguno de los municipios del Valle de Sula, la mejor alternativa a partir del LCOE más bajo es el sistema con seguidor de un eje horizontal; por lo que se recomienda la implementación de este tipo de sistema fotovoltaico. Luego el sistema con seguidor de dos ejes y por último el sistema con estructura fija.
2. La generación de electricidad obtenida es a partir de simulaciones con módulos monofaciales en PVSyst, por lo que se recomienda utilizar módulos bifaciales en futuras investigaciones.
3. Los costos específicos de capital se determinan a partir de valores en años anteriores, por lo cual se recomienda utilizar valores más recientes en futuras investigaciones.
4. Los costos de operación y mantenimiento corresponden a años anteriores, se recomienda para futuras investigaciones actualizar el valor de dichos costos.
5. Los valores de GCR utilizados en esta investigación son estandarizados y no corresponden específicamente para el área de estudio seleccionada, por tanto, se recomienda desarrollar una investigación exclusivamente para determinar los valores de GCR adecuados en la región del Valle de Sula.
6. Si no se cuenta con un terreno previamente, se recomienda ubicar el valor del terreno [$\$/m^2$] en los rangos mostrados en el análisis de sensibilidad de acuerdo con el esquema de financiamiento del proyecto, para determinar qué sistema es más conveniente implementar a partir del LCOE más bajo en el Valle de Sula.

VIII. APLICABILIDAD/IMPLEMENTACIÓN

Esta Comparación Tecno-Económica entre Sistemas Fotovoltaicos con Seguidores Solares y con Estructura Fija permite que toda aquella persona o empresa interesada en evaluar la implementación de un sistema fotovoltaico sobre suelo conozca cuál sistema es más conveniente implementar a partir del LCOE más bajo en cualquier municipio del Valle de Sula.

IX. EVOLUCIÓN DE TRABAJO ACTUAL / TRABAJO FUTURO

Esta investigación fue desarrollada considerando módulos solares monofaciales, una segunda etapa de este trabajo investigativo consistiría en utilizar módulos solares bifaciales y comparar el LCOE de cada escenario con los de esta investigación, para determinar si existe algún tipo de variación.

BIBLIOGRAFÍA

- Abella, B. M. (2015). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPO DE SEGUIDOR SOLAR PARA PANELES FOTOVOLTAICOS*. León .
- Adriana Robles, R. R. (2018). *Evaluación de producción de energía de sistemas fotovoltaicos con seguimiento solar vs estructuras fijas*. Sonora.
- allearthsolar*. (2016). Obtenido de <https://www.allearthrenewables.com/blog/dealers/dealers/comparing-the-power-production-of-roof-mount-solar-and-dual-axis-trackers>
- astrocole*. (2018). Obtenido de <https://astrocole.blogspot.com/2018/04/tabla-de-declinacion-solar.html>
- Autosolar*. (2018). Obtenido de [autosolar.pe](https://www.autosolar.pe)
- Barati, C. (2019). *pv magazine*.
- BID. (2019). *Evolución futura de costos de las energías renovables y almacenamiento en América Latina*.
- cambio energético*. (s.f.). Obtenido de <https://www.cambioenergetico.com/88-seguidores-solares-o-fotovoltaicos>
- cambioenergético*. (2017). Obtenido de <https://www.cambioenergetico.com/blog/influye-la-temperatura-rendimiento-placa-solar/>
- Castro, I. O. (Junio de 2020). (H. Andino, Entrevistador)
- CEPAL. (2016). *Estadísticas del subsector eléctrico de los países del sistema de la integración Centroamericana (SICA)*.
- damiasolar*. (2019). Obtenido de https://www.damiasolar.com/actualidad/blog/articulos-sobre-la-energia-solar-y-sus-componentes/cual-es-la-vida-util-de-los-paneles-solares_1
- GMT. (2018). *Global Solar PV PV Tracker Market Shares and Shipments*.

greenenergylatinamerica. (2019). Obtenido de <https://www.greenenergy-latinamerica.com/seguidores-solares-o-fotovoltaicos/>

Hassan Al Garni, A. A. (2017). *Techno-Economic Feasibility Analysis of a Solar PV Grid-Connected System with Different Tracking Using HOMER Software* .

hogarsense. (10 de Marzo de 2020). Obtenido de <https://www.hogarsense.es/energia-solar/seguidor-solar>

IHS. (2019). Obtenido de <https://www.pv-magazine.es/2019/11/19/pv-hardware-y-soltec-entre-los-cincos-mayores-proveedores-de-seguidores-del-mercado-mundial/>

Intelligence, M. (2019). *SOLAR TRACKER MARKET – GROWTH, TRENDS, AND FORECAST (2020-2025)*.

IRENA. (2019). *Informe sobre la transformación energética mundial*.

J. F. Lee, N. A. (2013). *Performance Comparison of Dual-Axis Solar Tracker vs Static Solar System in Malaysia* . Kuala, Lumpur.

Jackson, M. (Mayo de 2020). MECER y Helios . (H. Andino, Entrevistador)

Jose Simon, G. M. (2013). *Feasibility Study of Economics and Performance of Solar Photovoltaics at the Kerr McGee Site in Columbus, Mississippi*.

Lema, M. Á. (2015). *Diseño e Implementación de un Sistema Automático de Purificación de Agua por medio de Energía, Reflexión Solar y Luz Ultravioleta* .

Mamani, J. C. (2009). *Gestión Integral de Residuos Sólidos*.

Masih, A. (2019). *Performance Comparison of Dual Axis Solar Tracker with Static Solar System in Ural Region of Russia* . Ekaterinburg.

Om Krishan, S. (2018). *Optimum sizing and techno-economic analysis of grid-independent PV system under different tracking systems* .

Pedro García, R. P. (2016). *Implementación de un seguidor solar en eje horizontal controlado con hardware y software de libre distribución*. San Salvador.

- Perpiñán, Ó. (2011). *Energía Solar Fotovoltaica* . Madrid.
- Petros J. Axaopoulos, P., & Emmanouil D. Fylladitakis, MSc. (2013). *ENERGY AND ECONOMIC COMPARATIVE STUDY OF A TRACKING VS. A FIXED PHOTOVOLTAIC SYSTEM*. European Scientific Journal .
- Plan de Gestión Municipal San Pedro Sula*. (2015).
- quiminet. (2011). Obtenido de <https://www.quiminet.com/articulos/que-es-un-sistema-fotovoltaico-2638847.htm>
- Ragheb, M. (2017). *sciencedirect*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/levelized-cost-of-electricity>
- Ran Fu, D. F. (2018). *U.S. Solar Photovoltaic System Cost Benchmark: Q1 2018*.
- Reyes, F. (2018). *Pronóstico de demanda de energía fotovoltaica en San Pedro Sula*.
- Slideshare. (2011). Obtenido de Slideshare.net
- solar energía. (2009). Obtenido de <https://solar-energia.net/energia-solar-fotovoltaica>
- solarchoice. (2017). Obtenido de solarchoice.net
- solaredge. (2016). *Oversizing of SolarEdge Inverers, Technical Note*.
- solarpowerworld. (2013). Obtenido de <https://www.solarpowerworldonline.com/2013/12/solar-trackers-can-minimize-risk-maximize-reward/>
- Sonora, S. d. (2019).
- sotysolar. (2018). Obtenido de <https://sotysolar.es/placas-solares/seguidores-solares>
- Urbina, G. B. (2006). *Evaluación de Proyectos (5a. ed)*.
- Valle, D. O. (2015). *Plan de Negocios de una empresa instaladora de paneles solares térmicos*. Leganés.
- Vermaak, H. (2014). *Techno-economic analysis of solar tracking systems in South Africa*. Sudáfrica.

ANEXOS


Anexo 1-Especificaciones Técnicas de los Módulos Solares

SunPower® X-Series Commercial Solar Panels | X21-345-COM

More than 21% Efficiency
Captures more sunlight and generates more power than conventional panels.

Maximum Performance
Designed to perform in demanding real-world conditions of high temperatures, partial shade from overhead wires, and low light.¹

Commercial Grade
Intended for commercial sites where maximum energy production is critical.





Maxeon® Solar Cells. Fundamentally better.
Engineered for performance. Designed for reliability.

Engineered for Peace of Mind
Designed to deliver consistent, trouble-free energy over a very long lifetime.²

Designed for Reliability
The SunPower Maxeon solar cell is the only cell built on a solid metal foundation. Virtually impervious to the corrosion and cracking that degrade conventional panels.

Same excellent durability as E-Series panels. #1 Rank in Fraunhofer durability test.³


High Performance & Excellent Reliability

SPR-X21-345-COM

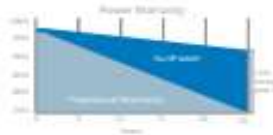
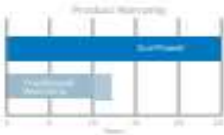
High Efficiency
Generate more energy per square foot

More energy to power your operations. X-Series commercial systems convert more sunlight to electricity by producing 43% more energy in the first year. This advantage increases over time, producing 60% more energy over the first 25 years to meet your needs.⁴




Best Reliability. Best Warranty

A better warranty starts with a better product. Proven performance backs up our industry-best coverage, including our warranted 0.25% per year degradation rate.⁵

¹ 90% guaranteed power. 90% for first year, -0.25%/yr. at year 25.
² Conventional Panels and Product defect. 25-year coverage.

Datasheet




SunPower® X-Series Commercial Solar Panels | X21-345-COM

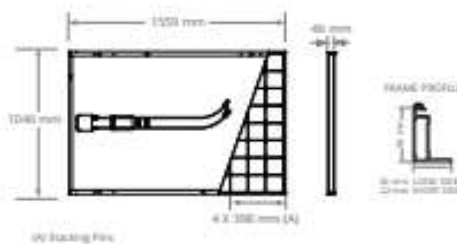
Electrical Data		
	SPR-X21-345-COM	SPR-X21-327-COM
Nominal Power (P _{nom}) ¹	345 W	327 W
Power Tolerance	+5% -3%	+5% -3%
Avg. Panel Efficiency ²	21.5%	20.3%
Rated Voltage (V _{MPP})	57.3 V	57.3 V
Rated Current (I _{MPP})	6.02 A	5.71 A
Open-Circuit Voltage (V _{OC})	68.2 V	67.6 V
Short-Circuit Current (I _{SC})	6.30 A	6.07 A
Max. System Voltage	1000 V UL & 1000 V IEC	
Maximum Series Fuse	15 A	
Power Temp. Coef.	-0.29% / °C	
Voltage Temp. Coef.	-167.4 mV / °C	
Current Temp. Coef.	2.0 mA / °C	

Operating Condition And Mechanical Data	
Temperature	-40° F to +135° F (-40° C to +55° C)
Impact Resistance	1 inch (25 mm) diameter ball at 52 mph (23 m/s)
Appearance	Class B
Solar Cells	96 Monocrystalline Maxeon Gen II
Tempered Glass	High transmission tempered anti-reflective
Junction Box	IP65, MC4 Compatible
Weight	41 lbs (18.6 kg)
Max. Load	Wind: 50 psf, 2400 Pa front & back Snow: 112 psf, 5400 Pa front
Frame	Class 2 clear anodized, stacking pins

Tests And Certifications	
Standard Tests ³	UL1703 (Type 2 Fire Rating), IEC 61215, IEC 61730
Management System Certs	ISO 9001:2015, ISO 14001:2015
EHS Compliance	RoHS, OHSAS 18001:2007, Lead free, REACH, SWHC, PCB, PV Code
Sustainability	Cradle to Cradle Certified™ Silver (contributes to LEED categories) ⁴
Ammonia Test	IEC 62716
Desert Test	ISO 11051/52:2013-0744437
Salt Spray Test	IEC 61701 (maximum severity)
PID Test	1000V, IEC 62804, PV81, 600hr duration
Available Listings	UL, TUV, CEC

NOTES:

- 1 SunPower 300W compared to Commercial Panel in same watt range (300W, 30% efficient, approx. 1.8 m²). 46 more energy per sq. foot based on 40% module characterization and PVWatts 4.7.76a by NREL. Degradation: SunPower LT vs. a "SunPower module Degradation Rate" SunPower white paper, 2019.
- 2 SunPower Module 40 Year Durability: SunPower white paper, May 2015. Could be a life span of 100 years depending on more than 70% of population.
- 3 See series name as 3 Series, 5 digit 3 panel technology record in 2013 report & additional panel in 2014. Series C, 4 or 6. The number 300 usually denotes the base module but 2" thickness is international, 20A.
- 4 See www.sunpower.com/learn-more for more details.
- 5 Standard Test Conditions (STC): 1000 W/m² irradiance, AM 1.5, 25° C, 100% relative humidity, 1025 Pa (29.52 in. Hg) air density.
- 6 Based on average of measured power values during production.
- 7 Type 2 fire rating per UL 1703-2014, Class C fire rating per IEC 61730-2:2011.
- 8 See www.sunpower.com for details.



Please read the safety and installation guide.

Document # S0100 Rev G, 6/18/18

©Sunpower 2017 SunPower Corporation. All rights reserved. SUNPOWER, the SunPower logo, MAXEON, and other are trademarks or registered trademarks of SunPower Corporation. Specifications included in this document are subject to change without notice.

SUNPOWER®

Anexo 2-Especificaciones Técnicas de los Inversores Sol

Fronius Aglio Outdoor 100.0-3	
Input data	
MPP voltage range	460 - 820 V DC
Max. input voltage (at 1000 W/m ² -10 °C in an open circuit)	950 V DC
Max. input current	227.0 A
Max. short circuit current of the solar modules	340.5 A
Output data	
Nominal output power (P _{nom})	100 kVA
Max. output power	100 kVA
Nominal grid voltage	3 ~ NPE 400 V / 230 V
Grid voltage tolerance	+10 / -5 % ¹⁾
Nominal output current (three-phase)	150.2 A
Nominal frequency	50 - 60 Hz ¹⁾
Total harmonic distortion	< 3 %
Power factor cos phi	0.8 - 1 ind./cap. ²⁾
Max. permitted mains impedance Z _{max} at PCC ³⁾	52 mΩHM
Max. feedback current ⁴⁾	0 A ⁵⁾
Starting current pulse ⁶⁾	0 A ⁵⁾
Max. output fault current per period	522 A / 2.47 ms
General data	
Maximum efficiency	97.2 %
Eurap. efficiency	96.6 %
Overnight internal consumption	38 W
Cooling	Controlled forced-air ventilation
Degree of protection	IP 44
Dimensions l x w x h	1205 x 863 x 1914 mm
Weight	806 kg
Permitted ambient temperature (4 - 100 % condensing)	- 25 °C - +50 °C
EMC emission class	A
Overvoltage category AC / DC	3 / 2
Degree of pollution	3
Protection devices	
DC insulation measurement	Warning/shutdown ⁷⁾ at R _{ISO} < 40 kΩhm
Manifestation of DC overload	Operating point shift power limitation
DC circuit breaker	integrated

Anexo 3-Especificaciones Técnicas del Seguidor de un Eje Horizontal

NEXTracker

Smart Single-Axis Solar Tracking System

Quality and Reliability from Day One

Quality and reliability are designed and tested into every NX Horizon component and system across our supply chain and manufacturing operations. NEXTracker is the leader in dynamic wind analysis and safety stowing, delivering major benefits in uptime and long-term durability. NX Horizon is certified to UL 2703 and UL 3703 standards, underscoring NEXTracker's commitment to safety, reliability and quality.

GENERAL AND MECHANICAL

Tracking type	Horizontal single-axis, independent row	Tracking range of motion	Options for $\pm 60^\circ$ or $\pm 50^\circ$
String voltage	1,500 V _{DC} or 1,000 V _{DC}	Operating temperature range	Self powered: -30°C to 65°C (-22°F to 131°F) AC powered: -40°C to 55°C (-40°F to 131°F)
Typical row size	78 - 90 modules, depending on module string length	Module configuration	1 in portrait: 3 x 1,500V or 4 x 1,000V strings per standard tracker. Partial length trackers available.
Drive type	Non-backdriving, high accuracy slew gear	Module attachment	Self-grounding, electric tool-actuated fasteners
Motor type	24V brushless DC motor	Materials	Galvanized steel
Array height	Rotation axis elevation 1.3 to 1.8 m / 4'3" to 5'10"	Allowable wind speed	Configurable up to 200 kph (125 mph) 3-second gust.
Ground coverage ratio (GCR)	Configurable. Typical range 28-50%	Wind protection	Intelligent wind stowing with symmetric dampers for maximum array stability in all wind conditions.
Modules supported	Mounting options available for virtually all utility-scale crystalline modules, First Solar Series 6 and First Solar Series 4.	Foundations	Standard W6 section foundation posts
Bifacial features	High-rise mounting rails, bearing + driveline gaps and sound torque tube		

ELECTRONICS AND CONTROLS

Solar tracking method	Astronomical algorithm with backtracking. TrueCapture™ upgrades available for terrain adaptive backtracking and diffuse tracking mode.
Control electronics	NX tracker controller with inbuilt inclinometer and backup battery.
Communications	Zigbee wireless communications to all tracker rows and weather stations via network control units (NCUs).
Nighttime stow	Yes
Power supply	Self powered: NX provided 30 or 60W Smart Panel AC powered: Customer-provided 120-240 V _{AC} circuit

INSTALLATION, OPERATIONS AND SERVICE

PE stamped structural calculations and drawings	Included
Onsite training and system commissioning	Included
Installation requirements	Simple assembly using swaged fasteners and bolted connections. No field cutting, drilling or welding.
Monitoring	NX Data Hub™ centralized data aggregation and monitoring
Module cleaning compatibility	Compatible with NX qualified cleaning systems.
Warranty	10-year structural, 5-year drive and control components
Codes and standards	UL 3703, UL 2703, IEC 62817

© NEXTracker Inc. Contents subject to change without notice.
6000 Texas Farm Parkway | Houston, TX 77036 | USA | +1 281 270 2000 | nextracker.com

NEX 000000 01

Anexo 4-Especificaciones Técnicas del Seguidor de Dos Ejes

Our most powerful Dual Axis Tracker



Tracking Type	Dual Axis
Model	PST-2AL
Module Area (Max)	80m ² (22 modules 72-cell or 122 modules 60-cell)
System Weight	1,070kg, without modules & foundation
Tracking Axis	Dual Axis: azimuth & vertical
Tracking Range of Motion	Azimuth: -135° to +135° Vertical: 0° to 60°
Azimuth Rotation	Slew drive
Vertical Tilt	Linear actuator
Power Supply to Controller	100-240VAC / 50 - 60Hz
Materials	Magnesium Alloy Coated Steel/ Hot Dip Galvanized
Solar Tracking Method	Real-Time Solar Sensor
Max Wind Speed	Standard 47m/s (105MPH)
Safety Mode (Automatic horizontal)	-Wind Mode -Less than 3,000 lux
(Tilted Position)	-Snow Mode
Temperature Range	-25 to 55°C (-13 to 131°F)

The above specifications could vary according to local conditions.

COMPONENTS

The PST-2AL utilizes our Power of Four components that offer unlimited flexibility and help increase production. With increase in design, they deliver great results and require minimal maintenance.



Control Box



Real Time Sensor



Slew Drive



Linear Actuator

Experience the PST-2AL

Watch Video



Sun Action Trackers

3000 Thousand Oaks, Suite 208 | San Antonio, Texas 78247

Phone: +1-202-517-5603

Email: info@sat-energy.com

www.sat-energy.com

Anexo 5-Resumen de Reporte PVsyst para Sistema Fotovoltaico con estructura fija

Municipio	Sistema Fotovoltaico	Generación Electricidad (Primer año) [MWh]	Generación Electricidad (25 años) [MWh]
Choloma	Estructura fija	19,598	475,529
El Negrito	Estructura fija	19,057	462,402
El Progreso	Estructura fija	19,246	466,988
La Lima	Estructura fija	19,489	472,885
Omoa	Estructura fija	19,493	472,982
Petoa	Estructura fija	19,035	461,869
Pimienta	Estructura fija	19,363	469,827
Potrerosillos	Estructura fija	19,340	469,269
Puerto Cortés	Estructura fija	19,675	477,398
Quimistán	Estructura fija	18,461	447,941
San Antonio de Cortés	Estructura fija	19,506	473,297
San Francisco de Yojoa	Estructura fija	19,173	465,217
San Manuel	Estructura fija	19,304	468,396
San Pedro Sula	Estructura fija	19,329	469,002
Santa Cruz de Yojoa	Estructura fija	19,157	464,829
Santa Rita	Estructura fija	18,219	442,069
Tela	Estructura fija	19,448	471,890
Villanueva	Estructura fija	19,445	471,817

Anexo 6-Resumen de Reporte PVsyst para Sistema Fotovoltaico con seguidor de un eje

Municipio	Sistema Fotovoltaico	Generación Electricidad Anual [MWh]	Generación Electricidad (25 años) [MWh]
Choloma	Seguidor de un eje	23,201	562,953
El Negrito	Seguidor de un eje	22,461	544,998
El Progreso	Seguidor de un eje	22,621	548,880
La Lima	Seguidor de un eje	23,034	558,901
Omoa	Seguidor de un eje	23,003	558,149
Petoa	Seguidor de un eje	22,596	548,273
Pimienta	Seguidor de un eje	22,976	557,494
Potrerosillos	Seguidor de un eje	22,833	554,024
Puerto Cortés	Seguidor de un eje	23,193	562,759
Quimistán	Seguidor de un eje	21,827	529,614
San Antonio de Cortés	Seguidor de un eje	23,192	562,735
San Francisco de Yojoa	Seguidor de un eje	22,727	551,452
San Manuel	Seguidor de un eje	22,798	553,175
San Pedro Sula	Seguidor de un eje	22,971	557,372
Santa Cruz de Yojoa	Seguidor de un eje	22,791	553,005
Santa Rita	Seguidor de un eje	21,558	523,087
Tela	Seguidor de un eje	22,962	557,154
Villanueva	Seguidor de un eje	23,045	559,168

Anexo 7-Resumen de Reporte PVsyst Sistema Fotovoltaico con seguidor de dos ejes

Municipio	Sistema Fotovoltaico	Generación Electricidad Anual [MWh]	Generación Electricidad (25 años) [MWh]
Choloma	Seguidor de dos ejes	24,728	600,005
El Negrito	Seguidor de dos ejes	23,911	580,181
El Progreso	Seguidor de dos ejes	24,141	585,762
La Lima	Seguidor de dos ejes	24,609	597,117
Omoa	Seguidor de dos ejes	24,588	596,608
Pettoa	Seguidor de dos ejes	24,062	583,845
Pimienta	Seguidor de dos ejes	24,449	593,235
Potrerosillos	Seguidor de dos ejes	24,314	589,959
Puerto Cortés	Seguidor de dos ejes	24,780	601,266
Quimistán	Seguidor de dos ejes	23,210	563,172
San Antonio de Cortés	Seguidor de dos ejes	24,617	597,311
San Francisco de Yojoa	Seguidor de dos ejes	24,169	586,441
San Manuel	Seguidor de dos ejes	24,262	588,698
San Pedro Sula	Seguidor de dos ejes	24,442	593,065
Santa Cruz de Yojoa	Seguidor de dos ejes	24,212	587,484
Santa Rita	Seguidor de dos ejes	22,806	553,369
Tela	Seguidor de dos ejes	24,484	594,084
Villanueva	Seguidor de dos ejes	24,575	596,292