

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

*Trabajo de titulación previo a
la obtención del título de
Ingeniero Eléctrico*

PROYECTO TÉCNICO CON ENFOQUE INVESTIGATIVO:

**“MODELADO MATEMÁTICO DE UNA ESTRUCTURA
REFLECTIVA PARA INCREMENTAR LA IRRADIANCIA
SOBRE PANELES SOLARES”**

AUTORES:

ORTIZ VIVAR CHRISTIAN ISRAEL
PARRA ORTEGA DIEGO FERNANDO

TUTOR:

ING. JOSÉ ALLER CASTRO, PHD.

CUENCA - ECUADOR

2019

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Christian Israel Ortiz Vivar con el documento de identificación N° 0302885090 y Diego Fernando Parra Ortega con documento de identificación N° 0106057961, manifestamos nuestra voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación: “MODELADO MATEMÁTICO DE UNA ESTRUCTURA REFLECTIVA PARA INCREMENTAR LA IRRADIANCIA SOBRE PANELES SOLARES”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: *Ingeniero Eléctrico*, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, mayo del 2019



Christian Israel Ortiz Vivar

C.I.: 0302885090



Diego Fernando Parra Ortega

C.I.: 0106057961

CERTIFICACIÓN

Yo, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: “MODELADO MATEMÁTICO DE UNA ESTRUCTURA REFLECTIVA PARA INCREMENTAR LA IRRADIANCIA SOBRE PANELES SOLARES”, realizado por Christian Israel Ortiz Vivar y Diego Fernando Parra Ortega, obteniendo el *Proyecto Técnico con enfoque investigativo*, que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, mayo de 2019

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'José Manuel Aller Castro', with a large, sweeping flourish extending from the end of the signature.

Ing. José Manuel Aller Castro PhD.

C.I.: 0151561800

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, Christian Israel Ortiz Vivar con el documento de identificación N° 0302885090 y Diego Fernando Parra Ortega con documento de identificación N° 0106057961, autores del trabajo de titulación: “MODELADO MATEMÁTICO DE UNA ESTRUCTURA REFLECTIVA PARA INCREMENTAR LA IRRADIANCIA SOBRE PANELES SOLARES”, certificamos que el total contenido del *Proyecto Técnico con enfoque investigativo* es de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, mayo del 2019



Christian Israel Ortiz Vivar

C.I.: 0302885090



Diego Fernando Parra Ortega

C.I.: 0106057961

DEDICATORIA

Dedico este proyecto:

Primeramente, a Dios y mi madre del Cielo por bendecirme con tantos favores recibidos en el transcurso de mi vida y por permitirme estar donde estoy, gracias a ellos he superado obstáculos que la vida me ha puesto.

A mi Padre José y a mi Madre Marlene por confiar en mí, que gracias a su apoyo incondicional y sus consejos que me llevan hacia la superación.

A mi hermano Carlos y mi abuelito Papi Lucho que en paz descansen y que desde el cielo me cuidan.

A mi hermano Andrés por su apoyo moral.

Finalmente, mi dedicatoria va dirigida a todos mis seres queridos que de una manera u otra me han apoyado en el transcurso de mi vida y quienes hicieron posible la culminación de este proyecto.

“De rodillas ante Dios y de pie ante el mundo”

Diego

DEDICATORIA

Dedico este proyecto:

A Dios.

Por haberme enseñado a amar y a valorar la vida de la forma en que las personas como yo aprendemos, por la sabiduría adquirida a lo largo de mi vida, la cual me ha ayudado a plantearme todos los ideales con los cuales me defiendo a diario, por darme la oportunidad de vivir y la de seguir viviendo.

A mi madre Anita.

Por no haberme dejado sólo en ningún momento de mi vida, a pesar de la distancia y de las circunstancias, por haberme dado siempre su amor, su apoyo y por haber creído y confiado en mí cuando a veces ni yo mismo lo hacía, por ser mi inspiración y la única razón por la que no me doy por vencido cada vez que quiero hacerlo.

A mi padre Mario.

Por haberme enseñado a su manera, a ser una buena persona, a superarme, a tener ambición, a dar lo mejor de mí en cada cosa que haga; por haberme enseñado a diferenciar lo bueno y lo malo, a enfrentar las consecuencias de una buena o mala decisión, por enseñarme que todos cometemos errores y podemos aprender de ello.

A mis tios: Isaac, René, Isabela.

Por haberme dado su apoyo incondicional en los momentos que más necesitaba, ya que de lo contrario este logro en mi vida no hubiera sido posible.

Christian

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dios por la sabiduría bendecida para enfrentar este proyecto y así lograr los objetivos que nos permitirán ser buenos profesionales con criterios éticos.

A nuestro director del trabajo de Titulación Dr. José Aller por sus enseñanzas y paciencia para la realización de este proyecto.

A nuestras familias por el apoyo mutuo e incondicional hacia nosotros.

A nuestros maestros y maestras de esta etapa universitaria quienes han tenido un papel muy importante en cuanto a nuestro aprendizaje en áreas que nos permitirán desenvolvernos correctamente en nuestra vida laboral.

A la Universidad Politécnica Salesiana que nos han inculcado valores morales y éticos ligados con la preparación académica para ser buenos profesionales.

Christian Ortiz

Diego Parra

RESUMEN

En el presente proyecto se realiza el modelado matemático de una estructura reflectiva propuesta por los autores para incrementar la irradiancia sobre paneles solares, de tal manera que se obtenga un factor de incremento y posteriormente, pueda ser utilizado para analizar el comportamiento del panel en cuanto a sus condiciones estándares como: eficiencia, potencia y temperatura.

La estructura reflectiva propuesta consta de espejos cuyas magnitudes tanto de orientación como de dimensiones se determinarán a través del modelamiento matemático del mismo. Durante el proceso de modelamiento, se ha considerado factores de gran importancia como el comportamiento de los distintos tipos de concentradores solares existentes en la actualidad, con la finalidad de analizar el efecto reflectivo de los mismos y aplicarlo.

ABSTRACT

In the present project the mathematical modeling of a reflective structure proposed by the authors is done to increase the irradiance on solar panels, in such a way that an increase factor is obtained and later, it can be used to analyze the behavior of the panel in terms of its standard conditions such as: efficiency, power and temperature.

The proposed reflective structure consists of mirrors whose magnitudes of both orientation and dimensions will be determined through mathematical modeling thereof. During the modeling process, factors of great importance have been considered, such as the behavior of the different types of solar concentrators currently in existence, in order to analyze the reflective effect of the same and apply it.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Problema de Estudio	1
1.2. Justificación	1
1.3. Objetivos	2
1.3.1. General:	2
1.3.2. Específicos:	2
1.4. Propuesta de Solución	2
1.5. Metodología	3
2. Fundamentos Teóricos	4
2.1. Energía Solar	4
2.2. Radiación Solar	5
2.3. Efecto Fotoeléctrico	6
2.4. Panel Fotovoltaico	7
2.4.1. Modelo Matemático de un Pánel Fotovoltaico	9
2.4.2. Curva de Corriente y Voltaje de un Panel Fotovoltaico.	10
2.5. Efecto de la Temperatura en los Paneles Solares	13
2.6. Inclinación y óptima posición	13
2.7. Energía de un panel Fotovoltaico	14
2.7.1. Hora Solar Pico en Cuenca-Ecuador	14
2.8. Superficies Corrugadas	14
2.9. Concentradores Solares	15
2.9.1. Concentradores Corrugados	15
2.9.2. Concentradores Planos	16
2.9.3. Reflectancia Espectral de Espejos de vidrio	17
2.9.4. Concentradores con Seguimiento	18
2.10. Seguidor Solar	18
3. Modelamiento Matemático	21
3.1. Diseño de la Estructura	21
3.2. Definición de Variables	24

3.3. Dimensiones de la estructura reflectiva.	26
3.4. Deducción de Ecuaciones.	29
3.4.1. Parte I	29
3.4.2. Parte II	32
3.5. Cálculo del factor de Incremento	35
4. Simulación y Orientación del Panel Fotovoltaico	36
4.1. Simulación en el software Simulink del panel Fotovoltaico	36
4.2. Orientación del Panel Fotovoltaico	40
5. Análisis de Resultados	42
5.1. Análisis del modelo matemático	42
5.2. Análisis del modelado del panel fotovoltaico.	44
5.3. Análisis Energético y Costos	48
6. Conclusiones y Recomendaciones	52

Índice de figuras

2.1. Tipos de radiación solar [6].	5
2.2. Efecto de la radiación solar en un plano horizontal [7].	6
2.3. Efecto de la radiación solar en un plano inclinado [7].	6
2.4. Panel Fotovoltaico [12].	8
2.5. Estructura de un Panel Fotovoltaico [14].	9
2.6. Modelo del panel fotovoltaico [16].	10
2.7. Curva Voltaje-Corriente y voltaje-Potencia de un panel fotovoltaico [15].	11
2.8. Efecto de la temperatura sobre la curva V-I de un panel Fotovoltaico[22].	13
2.9. Superficie corrugada [28].	15
2.10. a) Concentrador Plano b) Concentrador Corrugado [29].	16
2.11. Diagrama de un espejo horizontal [32].	16
2.12. Diagrama de un espejo inclinado [32].	17
2.13. Radiación reflejada en un espejo horizontal [31].	17
2.14. Reflectancias espectrales de espejos de vidrio de igual calidad y diferente espesores [24].	18
2.15. Diagrama de un concentrador con seguimiento [33].	18
2.16. Prototipo de un seguidor solar [34].	19
2.17. Curva de la potencia de un panel fotovoltaico estático [34].	19
2.18. Curva de la potencia de un panel fotovoltaico con seguidor solar [34]. . .	20
3.1. Ubicación del panel Fotovoltaico (base de la estructura).	21
3.2. Estructura propuesta con espejos.	22
3.3. Estructura propuesta (vista lateral).	22
3.4. Dimensiones de la estructura.	23
3.5. Vista lateral de la estructura.	23
3.6. Detalles para el análisis de la parte 2.	24
3.7. Análisis de la parte 2.	25
3.8. Detalles para el análisis de la parte 1.	27
3.9. Simplificación del lado 1 para el análisis.	29
3.10. Análisis para la aplicación de la ley de cosenos	32
3.11. Análisis para obtener el límite máximo.	33

4.1. Diagrama de bloques en simulink para la corriente I_0	37
4.2. Diagrama de bloques en simulink para la corriente I_{rs}	37
4.3. Diagrama de bloques en simulink para la corriente I_{sh}	38
4.4. Diagrama de bloques en simulink para la corriente I_{ph}	38
4.5. Diagrama de bloques en simulink para la corriente I_{pv}	39
4.6. Diagrama de bloques en simulink para la corriente final del panel fotovoltaico.	39
4.7. Diagrama de bloques en simulink para la corriente I_0	40
4.8. Diagrama de bloques en simulink para la corriente I_0	40
4.9. Sistema fotovoltaico usando un seguidor solar.	41
4.10. Acople de la estructura propuesta usando un seguidor solar.	41
5.1. Datos de entrada.	42
5.2. Dimensiones calculadas para la construcción y orientación de cada elemento de la estructura reflectiva.	43
5.3. Gráficas correspondientes al lado uno de la estructura	43
5.4. Gráficas correspondientes al lado dos de la estructura	44
5.5. Radiación constante y temperatura variable.	45
5.6. Temperatura constante y radiación variable.	45
5.7. Radiación constante y temperatura variable.	46
5.8. Temperatura constante y radiación variable.	46
5.9. Voltaje vs Potencia con factor de Incremento en condiciones Estándares.	47
5.10. Voltaje vs potencia con factor de incremento en condiciones reales.	48

Índice de tablas

2.1. Tipos de paneles fotovoltaicos [13].	8
4.1. Datos del panel fotovoltaico Q.Antum [37].	36
5.1. Datos iniciales [38, 39].	49
5.2. Costos de implementación.	49
5.3. Inversión final en cada caso (Las siglas 'SS' hacen referencia al 'Seguidor Solar').	49
5.4. Energía obtenida en 1 año y el precio equivalente.	50
5.5. Utilidad en cada caso durante el tiempo de vida de la instalación.	50
5.6. Costo de la implementación de un sistema estático para obtener la misma energía que se obtiene con el sistema propuesto.	51

Capítulo 1

Introducción

1.1. Problema de Estudio

Con el pasar del tiempo se han creado tecnologías para aprovechar las energías renovables de la manera más limpia sin causar daños al medio ambiente, tales como es la energía solar, eólica, hidráulica, biomasa, etc. Dichas energías utilizan recursos prácticamente inagotables provenientes del sol, pero el acceso a estas energías en los países del tercer mundo es difícil debido a los altos costos de implementación e instalación de las mismas. Hoy en día existen una variedad de paneles solares con diferentes eficiencias, y el precio de un panel solar se eleva conforme se incrementa su eficiencia. Hay que considerar que la radiación solar no es la misma en todos los puntos del planeta, por lo cual se deben hacer estudios previos de la radiación solar en el área donde se va a establecer una instalación de este tipo para verificar las posibilidades técnico-económicas comparativas de este desarrollo.

El costo de la generación de energía eléctrica usando paneles solares es relativamente elevado con respecto a otras formas de generación, sin mencionar los costos de implementación, superficie requerida para el emplazamiento de todos los equipos, tiempo de vida útil, entre otros factores.

1.2. Justificación

Existen varias investigaciones en donde se analizan los resultados que se obtienen en un panel fotovoltaico, al trabajar con incrementos de radiación, usando concentradores, sistemas reflectivos, ubicación y seguidores solares para obtener una mejor eficiencia.

Hay que considerar la variación de la temperatura y la polución del aire que ocasiona la contaminación de la superficie del panel solar. Analizando la ubicación vertical de dos paneles fotovoltaicos y un prisma reflectivo que va ubicado en la mitad de los mismos. Este sistema no afecta al rendimiento, pero tiene desventaja de ocupar mucho espacio.

Existen sistemas de orientación para aprovechar los puntos de mayor radiación, los cuales utilizan estructuras de doble eje, ejes axiales y ortogonales orientados con seguidores solares. La utilización de este tipo de estructuras resulta menos conveniente debido al costo de implementación y los resultados en cuanto al incremento de la potencia no son muy significativos.

1.3. Objetivos

1.3.1. General:

1. Determinar y simular un modelo matemático de una estructura reflectiva para incrementar la irradiancia sobre paneles solares.

1.3.2. Específicos:

1. Estudiar el efecto reflectivo de estructuras lisas y corrugadas sobre el incremento de radiación luminosa en paneles fotovoltaicos.
2. Proponer una estructura reflectiva que incremente la radiación sobre paneles fotovoltaicos convencionales.
3. Evaluar mediante modelos matemáticos las radiaciones obtenidas con el diseño propuesto.
4. Determinar la orientación óptima del panel solar y su reflector para incrementar la radiación efectiva según la posición del sol.

1.4. Propuesta de Solución

Para solucionar esta problemática, el presente trabajo plantea el desarrollo de el diseño y la simulación de una estructura reflectiva plana, la cual aprovecha la radiación más conveniente dentro de los tres tipos existentes, de tal forma que estas incidan sobre el panel fotovoltaico a un determinado ángulo.

Se propone encontrar un modelo matemático que permita analizar los resultados en cuanto al incremento de potencia, de radiación y de temperatura, para así seleccionar un panel adecuado que contemple todas las características que se requieran.

Se debe considerar la estructura reflectiva plana y al panel como un solo sistema, para encontrar una nueva orientación del mismo, de tal manera que el ángulo de incidencia de la radiación solar sobre el panel fotovoltaico se mantenga constante.

1.5. Metodología

La investigación se desarrolló en la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca y se considera un proyecto de desarrollo tecnológico y de investigación científica.

Etapa 1: Investigación general de modelos matemáticos existentes de estructuras reflectivas para aumentar la radiación solar en paneles fotovoltaicos. Revisar literatura en bases de datos bibliográficas.

Etapa 2: Determinar parámetros, variables y límites necesarios para poder realizar los cálculos respectivos del modelamiento matemático.

Etapa 3: Obtener ecuaciones a través de un modelamiento matemático, que muestren las dimensiones óptimas a las que se debe construir y orientar cada elemento de la estructura reflectiva para obtener la máxima concentración de radiación posible.

Etapa 4: Analizar y determinar el mejor ángulo de posición y orientación de la estructura reflectiva y el panel en conjunto con respecto a la orientación del sol.

Etapa 5: Simular las ecuaciones obtenidas en el software Matlab para su correspondiente validación matemática.

Etapa 6: Analizar, comparar y discutir los efectos del modelamiento matemático de la estructura reflectiva sobre los parámetros estándares de los paneles fotovoltaicos.

Etapa 7: Conclusiones y Recomendaciones

Capítulo 2

Fundamentos Teóricos

La radiación solar directa es la fuente primaria de la energía fotovoltaica, cuyo principio de conversión proviene de fenómenos electro-físicos que interactúan con módulos receptores de características semiconductoras. En este capítulo se explicará detalladamente la generación de energía eléctrica en paneles fotovoltaicos y la descripción de los concentradores planares cuyo objetivo es incrementar la radiación incidente sobre los paneles fotovoltaicos mediante reflectores como son los espejos. Los conceptos detallados proporcionan el marco conceptual para el modelado matemático de la estructura reflectiva que aborda el presente trabajo.

2.1. Energía Solar

El sol emite ondas electromagnéticas permitiendo la existencia de todo ser vivo en nuestro planeta Tierra y se encuentra a 149.6 millones de kilómetros del Sol. Convierte más de cuatro millones de toneladas de materia de hidrógeno a helio dando origen a la energía solar [1].

La mayoría de las energías renovables directas e indirectas provienen del Sol, entre las directas se tiene la energía solar fotovoltaica que consiste en obtener energía eléctrica mediante los paneles fotovoltaicos y la solar térmica que consiste en generar calor por medio de un sistema de captadores o colectores térmicos, el cual mediante un aerogenerador convertirá el vapor en energía eléctrica [2].

En la actualidad las energías renovables directas están en pleno auge tecnológico y económico debido a su reducido impacto medioambiental, aún cuando presentan cierto impacto cuantificable debido a su huella de CO_2 , originada durante su fabricación de paneles fotovoltaicos, baterías y convertidores electrónicos. Esta ventaja es lo que las convierte en una alternativa importante para compensar la creciente demanda energética [1, 3, 4].

2.2. Radiación Solar

Dentro del sol se lleva a cabo un proceso de fusión nuclear, donde se emite una energía electromagnética que viaja a una velocidad finita, comportándose como onda o partícula según el caso y esta energía llega a nuestro planeta a través del espacio. La radiación solar depende de la composición de la atmósfera terrestre y una vez dentro de la atmósfera se conoce con el nombre de irradiancia solar, la cual se define como cuanta potencia solar llega al planeta por unidad de área y su unidad es $[W/m^2]$. Por lo general, la irradiancia solar en la superficie de la tierra se encuentra alrededor de $1000 W/m^2$ y varía debido al movimiento de rotación y traslación de la Tierra, alcanzando su valor máximo en días despejados [5].

La irradiación solar se define como la cantidad de radiación que recibe una determinada área durante un intervalo de tiempo cuya unidad es $[Wh/m^2]$ [6, 7].

La radiación solar puede llegar de forma directa donde las ondas llegan sin ninguna interrupción, mientras que la forma difusa cambia su trayectoria por la dispersión de radiación solar en la atmósfera y la forma reflejada que ocurre cuando hay nubes densas, hace que una parte de la radiación se refleje en el exterior [6, 7].

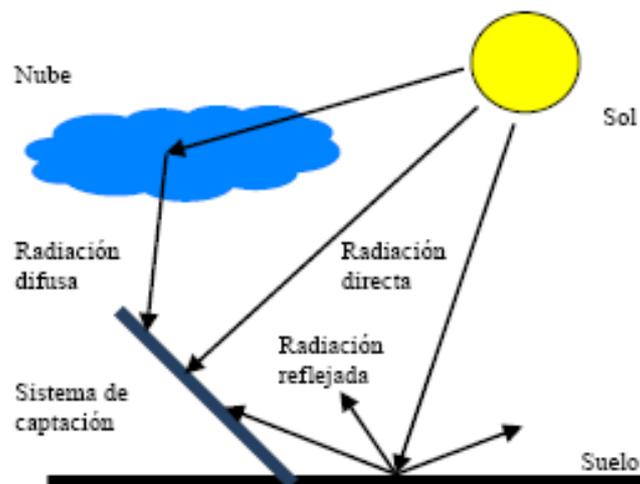


Figura 2.1: Tipos de radiación solar [6].

La radiación solar se determina en dos diferentes planos como se observa en las figuras 2.2 y 2.3.

- Plano horizontal. - La radiación directa es la que más incide de los tres tipos de radiación [7, 8].
- Plano Inclinado. - Se combina los tres tipos de radiación solar con el ángulo de incidencia [7, 8].

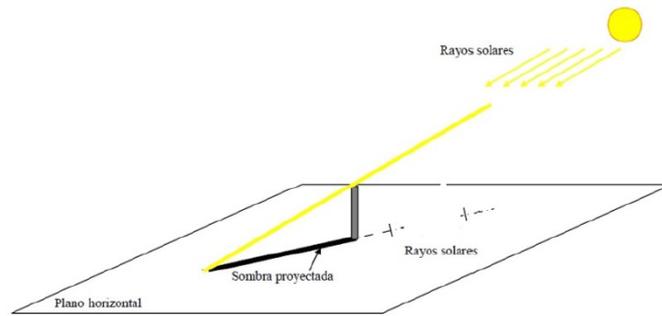


Figura 2.2: Efecto de la radiación solar en un plano horizontal [7].

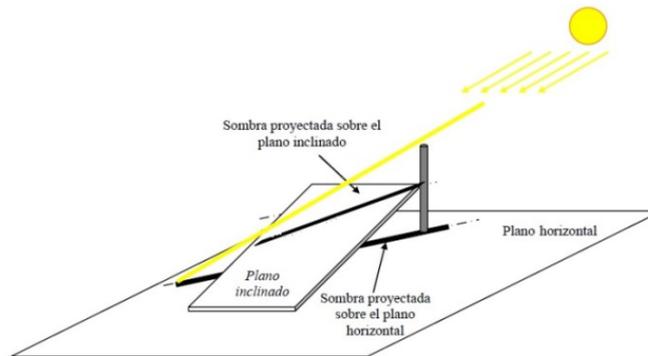


Figura 2.3: Efecto de la radiación solar en un plano inclinado [7].

2.3. Efecto Fotoeléctrico

El efecto fotoeléctrico fue una de las más importantes investigaciones realizadas por Albert Einstein, la cual fue la razón para otorgarle el premio nobel de Física en el año de 1921. Esta investigación ha servido como base matemática para la generación de energía eléctrica mediante el uso de paneles solares [9].

La luz proveniente del sol, se propaga por el espacio en forma de ondas electromagnéticas transportando energía en forma de cuantos de luz, llamados fotones. Esta energía está dada por la siguiente ecuación:

$$E_f = h \times f \quad (2.1)$$

Donde:

E_f : Energía del fotón,

h : constante de Planck ($6,63 \times 10^{-34} Js$),

f : frecuencia de la luz (Hz).

Si esta energía se hace incidir sobre un material de determinadas características, se desprende electrones los cuales empiezan a circular y por consecuencia se produce una corriente eléctrica. Las magnitudes de corriente y voltaje generados, dependen de la energía con la que se desprenden los electrones del material [9]. Esta energía, es la diferencia entre la energía con la que los fotones inciden sobre la superficie del material y la energía que se requiere para que se logre desprender un electrón del mismo [10]. Teniendo en cuenta estas consideraciones, se establece la siguiente ecuación:

$$W_e = h \times f_0 \quad (2.2)$$

$$E_1 = E_f - W_e \quad (2.3)$$

Donde:

W_e : Trabajo de extracción o función de trabajo,

f_0 : Frecuencia umbral.

E_1 : Energía del electrón emitido.

2.4. Panel Fotovoltaico

Está conformado por células fotovoltaicas donde su tamaño oscila entre $0,80m^2$ y $2m^2$, las mismas que consta de un material semiconductor, por lo general de Silicio pero en estado netamente cristalino, debido a que es capaz de transformar la radiación solar en energía eléctrica [11].

Las células fotovoltaicas están compuestas por dos capas: una de tipo "n" (electrón libre) que se origina del enlace atómico del silicio con el fósforo y otra de tipo "p" (hueco disponible) cuyo origen proviene del enlace atómico del silicio (Si) con el boro (B). Cuando se incide radiación solar en la capa n, los electrones se dispersan con el fin de encontrar un equilibrio, mientras que en la capa p detectan una región donde no hay disponibilidad de huecos. La unión de las dos capas produce un campo eléctrico y mediante un conductor externo que conecta la capa negativa con la positiva, circulan los electrones (corriente eléctrica) [12].

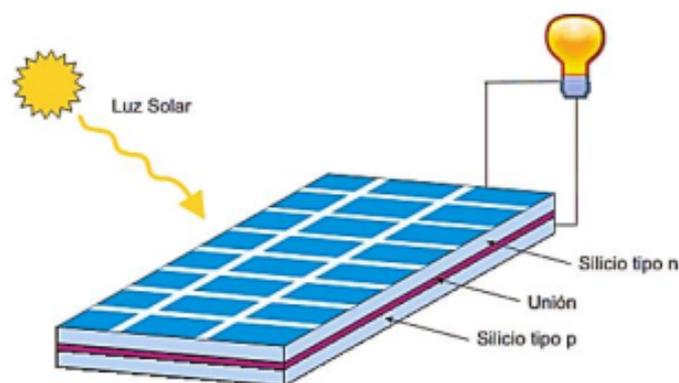


Figura 2.4: Panel Fotovoltaico [12].

Los tres tipos de paneles fotovoltaicos de silicio más utilizados en la industria se presentan en el siguiente cuadro 2.1:

Cuadro 2.1: Tipos de paneles fotovoltaicos [13].

Tipos	Características	Rendimiento
Monocristalino	Proceso de cristalización puro	16 %
Policristalino	Proceso de cristalización diferente	14 %
Amorfo	Proceso de cristalización nula, no es muy comercial	5 %

Un panel fotovoltaico está conformado por la unión de células fotovoltaicas conectados en serie-paralelo, ubicadas sobre una placa metálica muy bien forradas por un aislante térmico. Estas células, las mismas que están protegidas por un vidrio antireflectante y selladas por un marco perimetral de vidrio templado que sirve de protección. La finalidad de aquella unión es de aumentar la energía eléctrica pero la misma se ve afectado por la variación de radiación solar incidente y la temperatura interna del panel fotovoltaico [14, 15].

Al acoplar paneles fotovoltaicos mediante configuraciones serie y paralelo se incrementará linealmente la energía eléctrica, debido a las variaciones del voltaje y la corriente, donde se debe tener en cuenta que la conexión serie aumenta el voltaje manteniendo constante la corriente, mientras que la conexión en paralelo aumentará la corriente manteniendo constante el voltaje. La vida útil es aproximadamente de 25 años, después de los cuales el rendimiento disminuye [15].

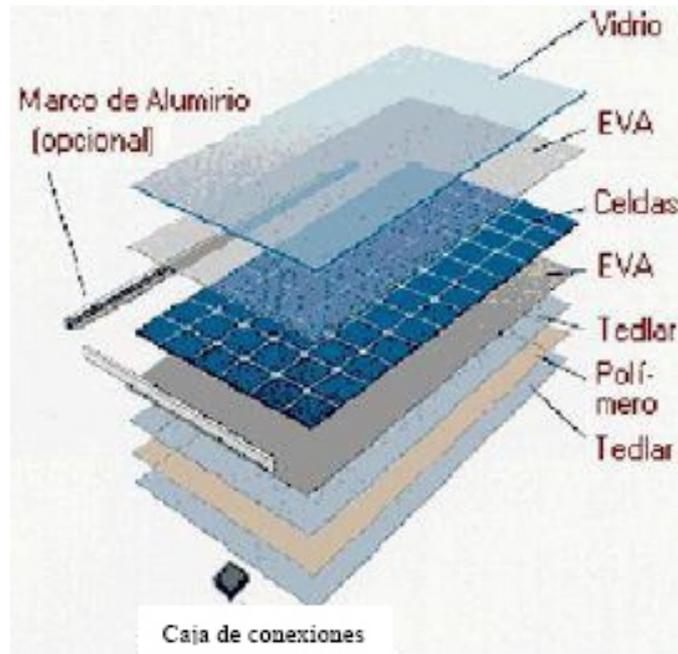


Figura 2.5: Estructura de un Panel Fotovoltaico [14].

2.4.1. Modelo Matemático de un Pánel Fotovoltaico

Se han desarrollado diferentes modelos matemáticos de paneles fotovoltaicos, pero todos los modelos se enfocan en la relación resultante de corriente-voltaje de un diodo donde la corriente está en función de la temperatura y la radiación solar [16].

$$I_c = I_L - I_d \left(e^{\frac{qV_d}{mkT}} - 1 \right) - \frac{V_d}{R_p} \quad (2.4)$$

$$V_c = V_d - I_c \cdot R_s \quad (2.5)$$

Donde:

- I_L : Corriente foto generada.
- I_c : Corriente del panel fotovoltaico.
- m : Factor de idealidad del diodo, que varía entre 1 y 2.
- I_d : Corriente de saturación inversa, depende de la temperatura.
- q : Carga elemental del electrón, $1,6 \times 10^{-19} C$
- k : Constante de Boltzmann, $1,38 \times 10^{-23} J/K$.
- T : Temperatura Absoluta.
- R_s : Resistencia en serie.

- R_p : Resistencia en Paralelo.
 V_d : Voltaje de la resistencia en paralelo.
 V_c : Voltaje de salida del panel solar.

El factor de idealidad ' m' ' permite distinguir entre celdas de silicio (Si) y de germanio (Ge) dependiendo de la tecnología de fabricación. Para este análisis, debido al incremento de radiación, se debe tener en cuenta estos valores de resistencias debido a que dependen de la temperatura sobre la celda.

El circuito eléctrico equivalente está conformado por elementos pasivos y consta de una fuente foto generada por radiación solar, un diodo, una resistencia en paralelo y otra en serie (representa la resistencia interna del material, cuyo dato es proporcionado por el fabricante en la prueba estándar) como se observa en la figura 2.6 [15, 16, 17].

La resistencia serie se modela como pérdidas de potencia debido a la circulación de corriente a través de diferentes partes del panel. La resistencia en paralelo representa las corrientes de fuga de la unión p-n [18].

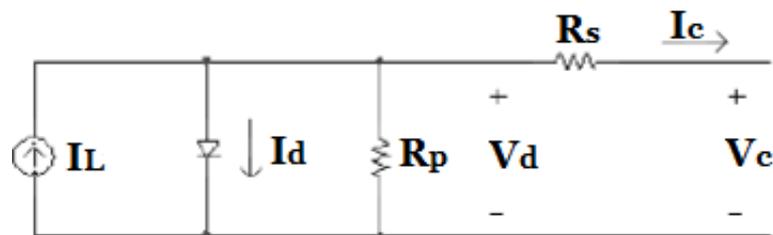


Figura 2.6: Modelo del panel fotovoltaico [16].

2.4.2. Curva de Corriente y Voltaje de un Panel Fotovoltaico.

Los valores de voltaje, corriente y potencia característicos de un panel fotovoltaico, están en función de la temperatura y la irradiación solar. Estas magnitudes eléctricas se representan mediante gráficas las cuales se pueden observar en la figura 2.7 [15].

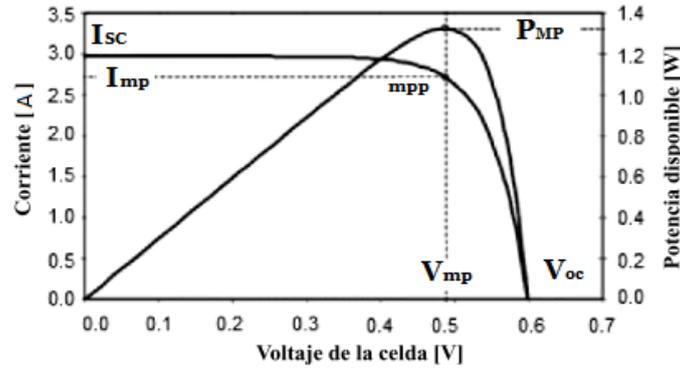


Figura 2.7: Curva Voltaje-Corriente y voltaje-Potencia de un panel fotovoltaico [15].

Se conoce como circuito abierto cuando $V = V_{oc}$, el voltaje del panel es máximo y su corriente es casi nula. Si el panel está conectado con una resistencia casi nula, el voltaje es mínimo y la corriente se llama corriente de cortocircuito I_{SC} llegando a su corriente máxima [18].

Como se observa en la figura 2.7, existen valores máximos, tanto de tensión como de corriente y en esos valores el p nel no genera energía, por lo tanto se debe encontrar un punto $(V_{mp}; I_{mp})$ donde se obtiene la potencia máxima P_{mp} generada por el panel.

La corriente foto generada se obtiene de la siguiente ecuación:

$$I_L = \frac{S}{S_{REF}} [I_{L,REF} + \mu_{ISC}(T - T_{REF})] \quad (2.6)$$

Donde:

I_L : Corriente foto generada

S : Irradiación solar $\left[\frac{W}{m^2}\right]$

S_{REF} : Irradiación solar de referencia $1000 \left[\frac{W}{m^2}\right]$

$I_{L,REF}$: Corriente de referencia, puede ser tomada como la corriente de cortocircuito en condiciones de referencia ($I_{L,REF} = I_{SC}$)

μ_{ISC} : Coeficiente de cortocircuito, es dado por el fabricante [15].

T : Temperatura ambiente $[^\circ K]$

T_{REF} : Temperatura de referencia $[^\circ K]$

La corriente de saturación inversa está dada por:

$$I_d = I_{O,REF} \left(\frac{T}{T_{REF}}\right)^3 e^{\frac{qE_g}{KA} \left(\frac{1}{T_{REF}} - \frac{1}{T}\right)} \quad (2.7)$$

Donde:

$I_{O,REF}$: Corriente de saturación inversa en condiciones de referencia [A]

E_G : Energía del semiconductor en su banda gap [15].

q : Carga elemental del electrón, $1,6 \times 10^{-19} C$

K : Constante de Boltzmann, $1,38 \times 10^{-23} J/K$.

A : Factor de idealidad del diodo [17].

T : Temperatura ambiente [$^{\circ}K$]

T_{REF} : Temperatura de referencia [$^{\circ}K$]

La eficiencia de una celda solar no se ve afectada por la variación de la resistencia en paralelo debido a las impurezas del silicio, por lo que normalmente se considera que su valor es relativamente mayor con respecto a la resistencia serie [19].

Las ecuaciones de la resistencia en serie (R_s) y en paralelo (R_p) se obtuvieron mediante la relación serie paralelo (SPR), donde esta relación permite clasificar las fuentes fotovoltaicas en cuanto a la posibilidad de modelada con $R_s = 0; R_p \neq 0$ en dos diferentes casos que se explican a continuación [19].

$$SPR = (1 - \gamma_i)e^r \quad (2.8)$$

Donde,

$$r = \frac{\gamma_i(1 - \gamma_v)}{\gamma_v(1 - \gamma_i)}; \gamma_i = \frac{I_{mp}}{I_{sc}}; \gamma_v = \frac{V_{mp}}{V_{oc}}$$

Para $SPR > 1$ se obtiene R_s [19].

$$R_s^* \approx \frac{V_{oc}}{I_{sc}} \frac{\frac{\gamma_v}{\gamma_i}(1 - \gamma_i) \ln(1 + \gamma_i) + (1 + \gamma_v)}{(1 - \gamma_i) \ln(1 + \gamma_i) + \gamma_i} \quad (2.9)$$

Para $SPR < 1$ se obtiene R_p mediante la aproximación de la función de Lambert "W" [19].

$$R_p^* \approx \frac{V_{oc}}{I_{sc}} \frac{\lambda_2 W(-SPR \lambda_1 e^{-\lambda_1}) + \lambda_1}{W(-SPR \lambda_1 e^{-\lambda_1}) + \lambda_1} \quad (2.10)$$

Donde:

$$\lambda_1 = \frac{1 - \gamma_v}{1 + \gamma_i} \frac{2\gamma_i - 1}{\gamma_i + \gamma_v + 1}$$

$$\lambda_2 = \frac{\gamma_v}{1 - \gamma_i}$$

2.5. Efecto de la Temperatura en los Paneles Solares

Los dispositivos semiconductores se ven afectados por la temperatura, debido que esta reduce la banda prohibida, afectando a todos los parámetros del panel fotovoltaico [12]. El rendimiento de los paneles solares fotovoltaicos se afecta por la temperatura de trabajo en el orden de 0,5, donde las principales variables perjudicadas son: el voltaje de circuito abierto que disminuye, la corriente de cortocircuito la cual aumenta ligeramente, el factor de forma que disminuye y el decrecimiento en el rendimiento del p panel solar. [12, 20, 21]. Con el aumento de la temperatura la curva $V - I$ se ve afectada por lo cual el valor de la corriente de cortocircuito se mantiene aproximadamente constante y el valor del voltaje de circuito abierto se va reduciendo, provocando que la potencia máxima P_{mpp} sea drásticamente reducida como se observa en la figura 2.8 [22].

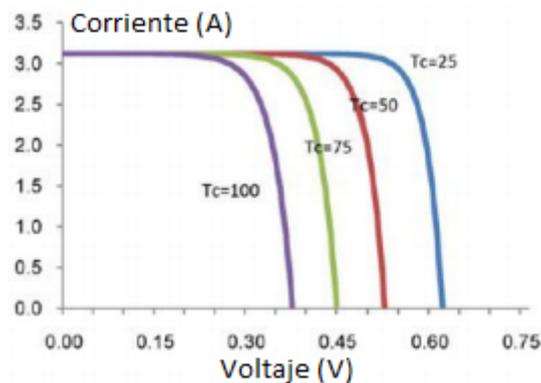


Figura 2.8: Efecto de la temperatura sobre la curva V-I de un panel Fotovoltaico[22].

La siguiente ecuación se muestra la temperatura T_c de un panel Fotovoltaico [22].

$$T_c = T_a + (T_{NOCT} - T_r) \frac{G}{G_r} \quad (2.11)$$

Donde:

T_r : Temperatura de referencia

G_r : Radiación de Referencia $1000 \frac{W}{m^2}$

T_a : Temperatura ambiente

T_{NOCT} : Temperatura de célula en condiciones normales de operación

G : Radiación incidente sobre el panel fotovoltaico.

2.6. Inclinación y óptima posición

Existen varios modelos matemáticos para la evaluación del ángulo de inclinación y la óptima posición para los sistemas fotovoltaicos, hay que considerar que para la radiación

directa el modelo matemático se obtiene mediante relaciones trigonométricas, en cambio para la radiación difusa y global el modelo matemático trata a la componente de radiación difusa como distribuido anisotrópicamente, donde la irradiancia es la suma de los componentes difusos del cielo circundante y del fondo [25]. El modelo más antiguo y más usado es el de Duffie y Beckman [27].

En Cuenca Ecuador, se realizó una investigación para determinar la captación solar, donde el ángulo óptimo es 30 grados con respecto al norte a una inclinación de 16 grados para captar la mayor irradiación solar anual [13].

2.7. Energía de un panel Fotovoltaico

Se debe considerar dos factores:

- Potencia pico del panel Fotovoltaico.
- La hora solar pico del lugar donde se va a instalar el panel fotovoltaico, que es el cociente entre el valor de la irradiación incidente promedio y la irradiancia estándar de medida que es 1000 W/m^2 [2].

Para calcular la energía que emite un panel fotovoltaico es el producto entre los días del año por las horas solar pico y la potencia pico del panel fotovoltaico [26].

$$E = 365 \cdot HSP \cdot Pot_{pv} \text{ [Wh/año]} \quad (2.12)$$

2.7.1. Hora Solar Pico en Cuenca-Ecuador

Para calcular la hora solar pico en Cuenca-Ecuador se tuvo que acceder a la base de datos de la estación meteorológica, ubicado en la universidad Politécnica Salesiana cuyas coordenadas son las siguientes: -2.88619, -78.98858, 2556.

Los datos de radiación global vienen en una hoja de Excel, se procede a calcular la HSP en un día soleado dando el resultado de 4.761 h/día

2.8. Superficies Corrugadas

Se considera una superficie corrugada aquella dotada de estrías o resaltos de forma rectangular de diferentes profundidades como se observa en la figura 2.9, en el literal a se observa lateralmente a la superficie corrugada, mientras que en el literal b se observa una vista superior [28].

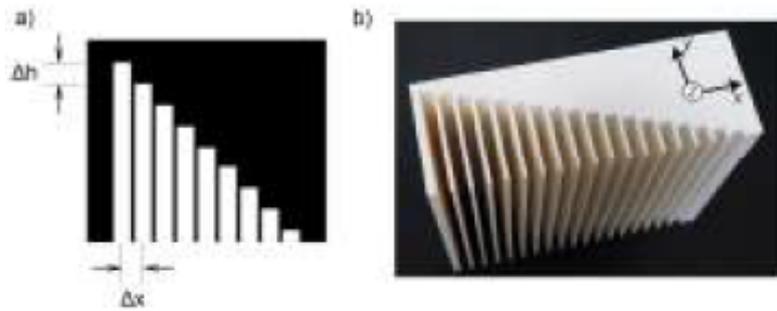


Figura 2.9: Superficie corrugada [28].

2.9. Concentradores Solares

Los concentradores solares son dispositivos compuestos de materiales reflectivos que pueden ser: espejos parabólicos o planos y lentes de concentración, cuyo objetivo es aumentar el valor de la irradiancia, desviando la luz de superficie a otra por lo general más pequeña [29].

Existen dos tipos de concentradores los de enfoque y los fijos donde los de enfoque consiste en una orientación precisa y con gran exactitud para seguir al Sol y los fijos permiten incrementar la intensidad de la radiación solar cuyo ángulo del receptor es grande, por lo cual le permite tener mayor captación [29].

Las principales ventajas de los concentradores solares es la reducción de los costos de inversión, debido al precio de la superficie reflectora, que es más barata que un absorbedor [29, 31].

2.9.1. Concentradores Corrugados

El uso de concentradores corrugados puede dirigir parte de la radiación, pero su cálculo es muy complicado debido que no puede ser reducido a un problema de dos dimensiones debido a su superficie, donde para ángulos de corrugación altos, la radiación también puede reflejarse de manera múltiple antes de que salga del reflector. Por lo tanto, cada rayo que incide se debe rastrear individualmente a través del sistema de cálculos vectoriales para determinar si alcanza la apertura del colector o panel solar [30].

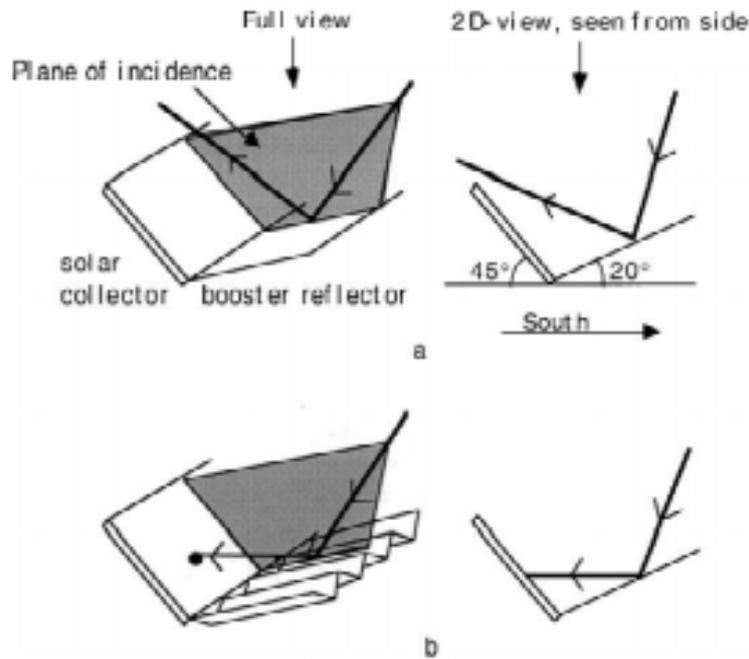


Figura 2.10: a) Concentrador Plano b) Concentrador Corrugado [29].

2.9.2. Concentradores Planos

Los concentradores planos son los más fáciles de diseñar y más accesibles económicamente, debido a que la mayoría están diseñados con espejos o aluminio; estos concentradores tienen un ángulo de captación muy grande y concentración baja, cuya orientación debe ser horizontal de este a oeste. Se han diseñado concentradores de espejos donde la luz incide en un rango de 0 hasta el mayor ángulo de aceptación siguiendo las leyes de la reflexión [29, 31].

Como se puede observar en la figura 2.13 la radiación se refleja en un espejo horizontal hacia un colector ubicado a un ángulo Beta.

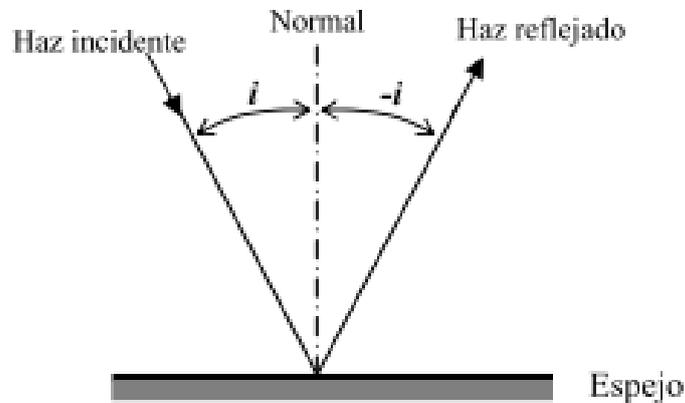


Figura 2.11: Diagrama de un espejo horizontal [32].

Cuando el espejo es inclinado a un ángulo α , entonces el ángulo reflejado será dos veces el ángulo de inclinación, como se observa en la figura 2.12 [32].

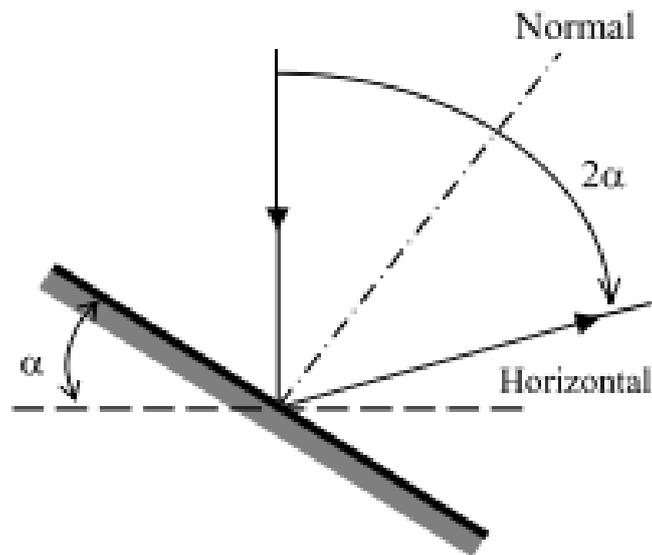


Figura 2.12: Diagrama de un espejo inclinado [32].

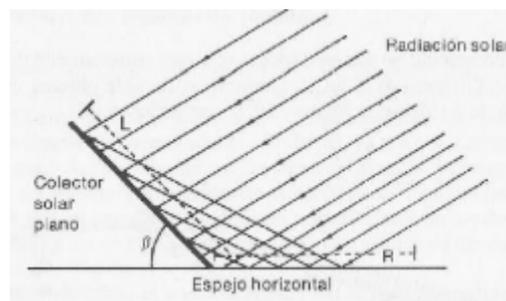


Figura 2.13: Radiación reflejada en un espejo horizontal [31].

La ecuación que rige en este tipo de concentrador es:

$$\text{sen}\theta = -\text{sen}\beta \Rightarrow \theta = \beta \quad (2.13)$$

Donde:

θ Ángulo incidente

β Ángulo de reflejado [32].

2.9.3. Reflectancia Espectral de Espejos de vidrio

En la siguiente imagen se muestra el resultado de reflectancia espectral aplicado a espejos de vidrios de calidad similar y de diferentes espesores, donde se llegó a dos conclusiones:

La primera “disminución de la reflectancia con el aumento del espesor del espejo, provocado por la mayor atenuación del vidrio, que debe ser atravesado dos veces” y la segunda “una notoria disminución de la reflectancia con el aumento de la longitud de onda” [24].

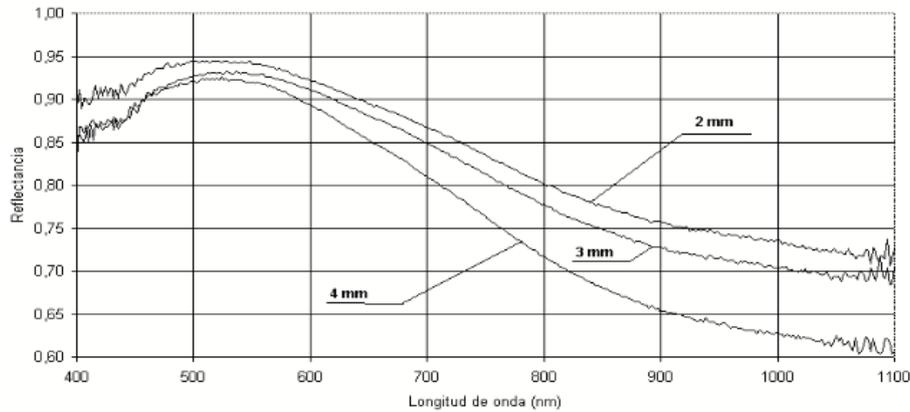


Figura 2.14: Reflectancias espectrales de espejos de vidrio de igual calidad y diferente espesores [24].

2.9.4. Concentradores con Seguimiento

Son utilizados cuando requieren mayor concentración por un tiempo mayor a 6 horas, estos tipos de concentradores pueden ser rotados mediante ejes orientados de norte a sur o de este a oeste para seguir al sol interceptando mayor radiación directa posible [31, 33].

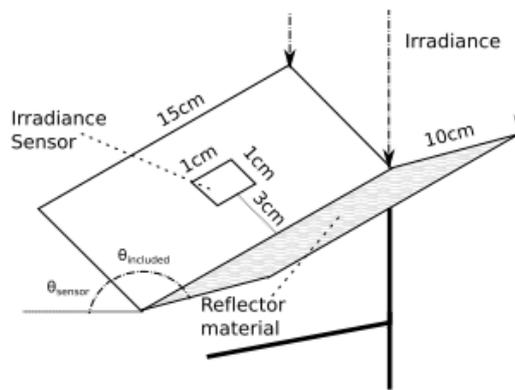


Figura 2.15: Diagrama de un concentrador con seguimiento [33].

2.10. Seguidor Solar

Un seguidor solar es un dispositivo electromecánico compuesto por una parte fija y móvil, cuyo fin es ubicar el panel fotovoltaico en un punto de máxima radiación. Su funcionamiento se basa en una estructura plana que se ubica perpendicular a los rayos del sol y mediante la parte móvil va siguiendo la trayectoria del mismo durante el día [34, 35].

Se clasifican dependiendo de los giros de libertad: un solo eje, dos ejes y los algoritmos de seguimiento: Luminosidad mediante sensores, programación astronómica mediante ecuaciones que predicen la ubicación del sol [34, 35].

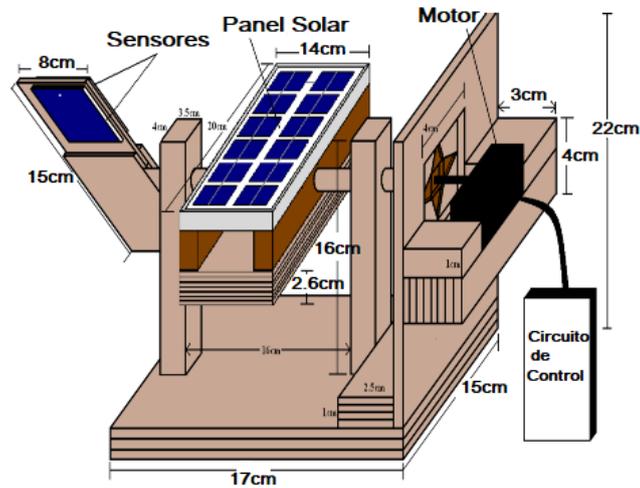


Figura 2.16: Prototipo de un seguidor solar [34].

En la figura 2.17 se observa la curva de la potencia de un panel fotovoltaico sin seguidor solar, donde la curva cambia drásticamente debido a la trayectoria del sol empezando desde cero donde el sol sale llegando a un punto máximo que es el medio día y va decayendo la curva en la puesta del sol [34].

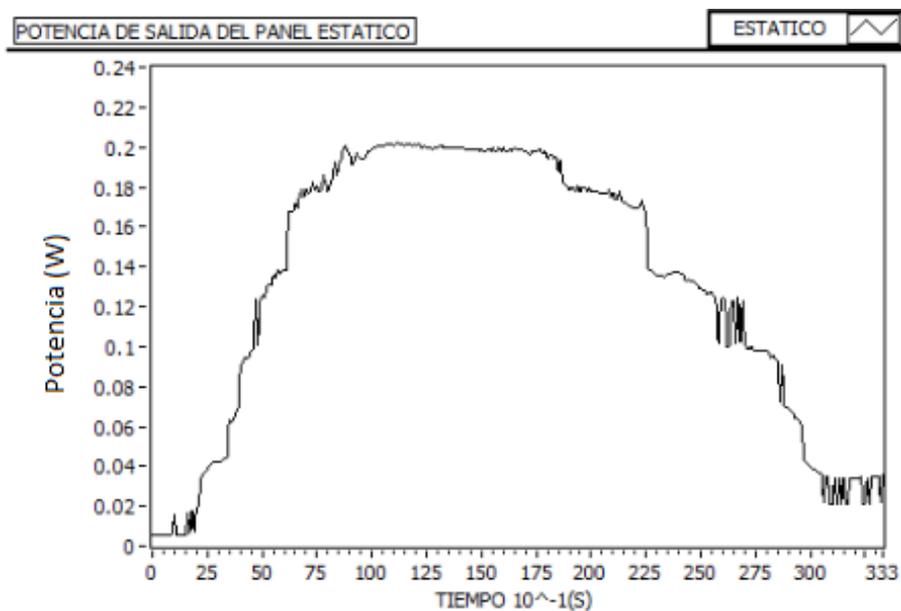


Figura 2.17: Curva de la potencia de un panel fotovoltaico estático [34].

En la figura 2.18 se observa la curva de potencia casi constante del panel fotovoltaico con seguidor solar debido que este, posiciona al panel fotovoltaico donde hay mayor radiación solar [34].

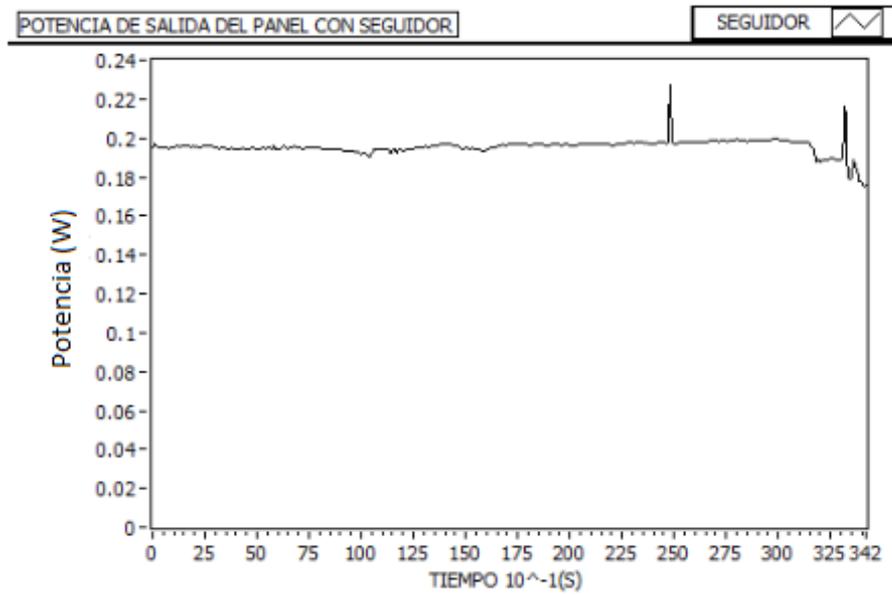


Figura 2.18: Curva de la potencia de un panel fotovoltaico con seguidor solar [34].

La implementación de los seguidores solares, mejora la eficiencia de una instalación fotovoltaica en un 35% [34].

Capítulo 3

Modelamiento Matemático

En este capítulo se determina el modelo matemático de la estructura reflectiva, aplicando los conceptos de geometría analítica y trigonometría, para así obtener los límites y la ecuación general que determina la estructura reflectiva propuesta.

3.1. Diseño de la Estructura

Inicialmente, se propone una estructura con la cual se pretende incrementar la radiación que incide sobre el panel mediante un juego de reflectores, los cuales tienen ciertas dimensiones y deberán estar ubicados a un determinado ángulo para que proyecte sobre la superficie del panel toda la radiación posible. La estructura se muestra en la figura 3.1, 3.2 y 3.3.

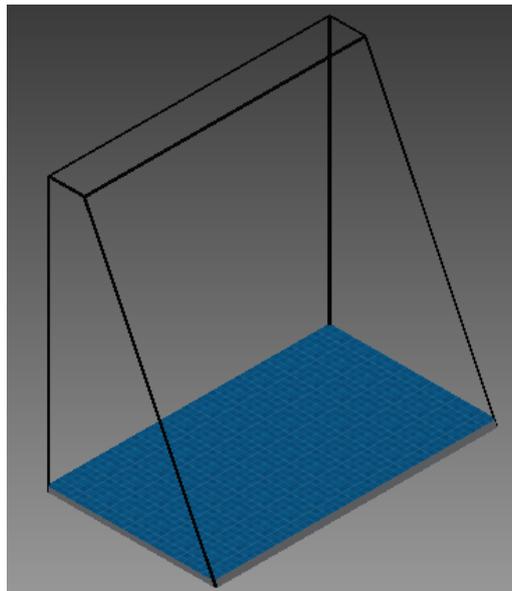


Figura 3.1: Ubicación del panel Fotovoltaico (base de la estructura).

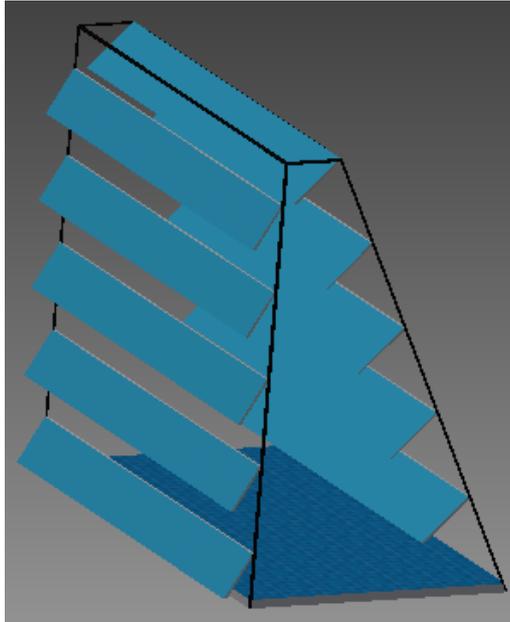


Figura 3.2: Estructura propuesta con espejos.

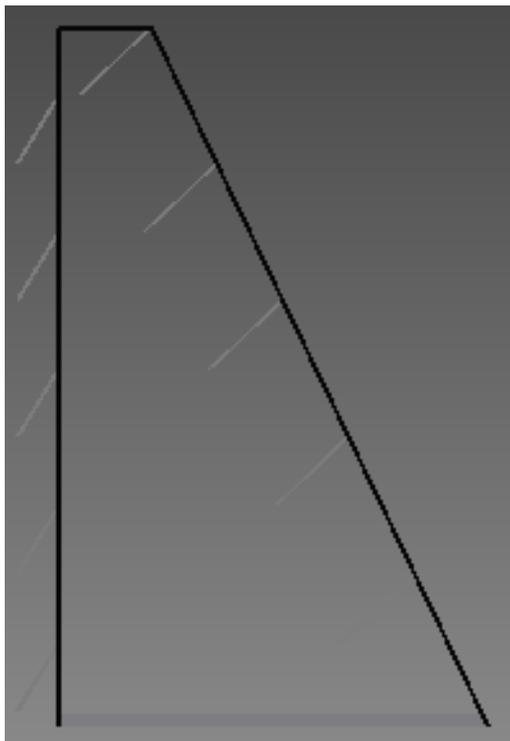


Figura 3.3: Estructura propuesta (vista lateral).

En la siguiente figura 3.4, se observa la estructura en 2D, donde se detalla las dimensiones a considerar para realizar los cálculos respectivos y así obtener los datos de longitud y ángulos establecidos.

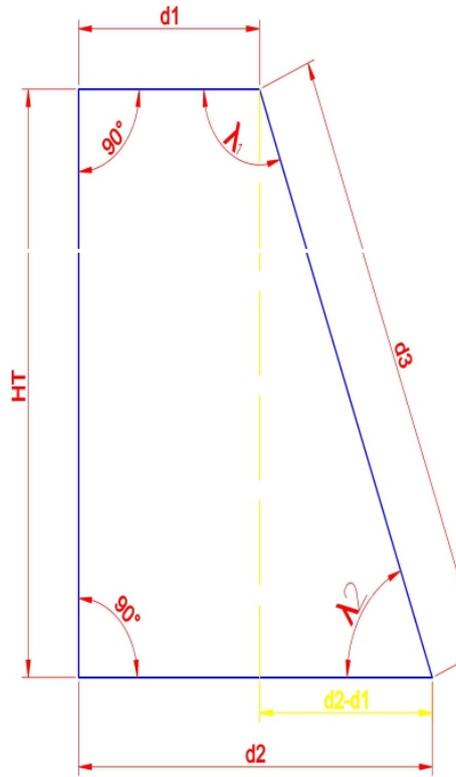


Figura 3.4: Dimensiones de la estructura.

Para explicar de mejor manera el análisis, se dividirá la estructura en dos partes las cuales se muestran en la figura 3.5.

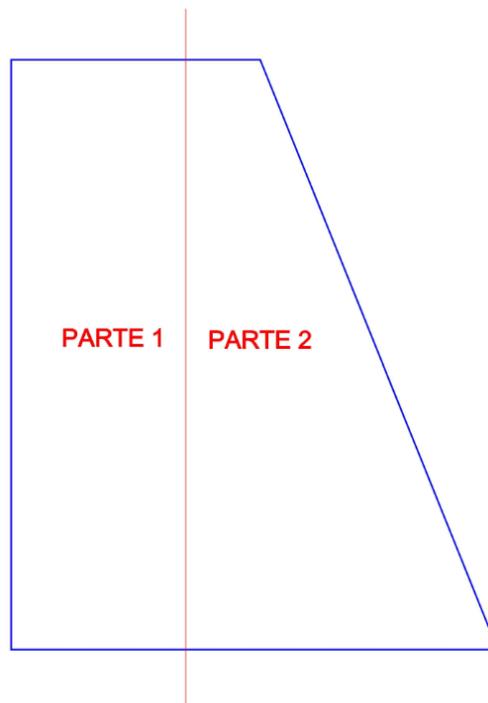


Figura 3.5: Vista lateral de la estructura.

3.2. Definición de Variables

En la figura 3.6, se muestra las partes que conforman la estructura para el respectivo análisis.

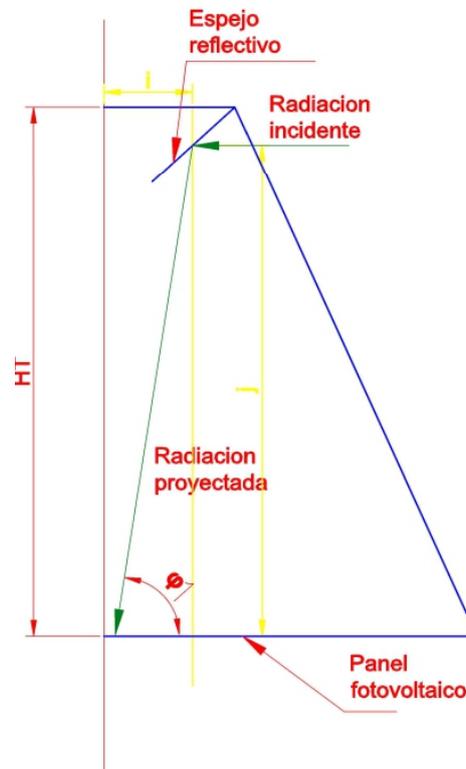


Figura 3.6: Detalles para el análisis de la parte 2.

Para encontrar las dimensiones y el ángulo de orientación del reflector, se establecerán los siguientes datos:

φ_1 : Ángulo al que incide la radiación proyectada desde el reflector,

A : Ángulo de ubicación del reflector

H_T : Altura total de la estructura,

$L_1 \times L_2$: Dimensiones del panel solar,

n : número total de reflectores a usar en la estructura,

m : ancho del cristal.

En la figura 3.7, se muestra los ángulos y dimensiones necesarias para realizar el respectivo análisis de esta parte. Hay que tener en cuenta ciertas consideraciones tales como:

- Sombras entre los reflectores.

- Análisis usando sólo radiación directa.
- Cantidad de superficie que se pretende incrementar.
- Existen límites para la variación de los ángulos al que van orientados los reflectores.
- Se considera que la distancia entre los reflectores es la misma.
- El número total de reflectores n se divide en dos partes iguales: n_1 distribuidos uniformemente en la parte uno de la estructura y n_2 distribuido en la parte dos.

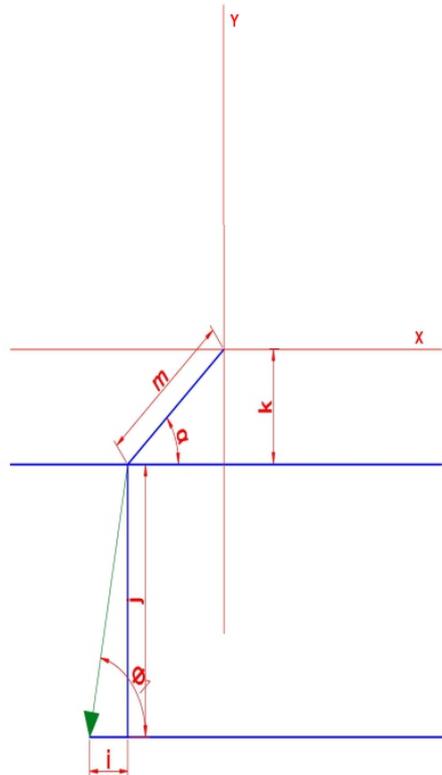


Figura 3.7: Análisis de la parte 2.

Para encontrar la distancia d_1 , se realiza el siguiente análisis:

$$k = \frac{h_T}{n}$$

$$m = \frac{k}{\sin \alpha}$$

$$\alpha = \frac{\varphi_1}{2} \tag{3.1}$$

$$d_1 = i + m \cos \alpha$$

$$d_1 = \frac{j}{\tan \varphi} + \frac{k}{\sin \alpha} \cos \alpha$$

$$d_1 = \frac{h_T - k}{\tan \varphi_1} + k \cot \alpha$$

$$d_1 = \frac{h_T - \frac{h_T}{n}}{\tan \varphi_1} + \frac{h_T}{n} \cot \alpha$$

$$d_1 = \frac{h_T(1 - \frac{1}{n})}{\tan \varphi_1} + \frac{h_T}{n} \cot \alpha \quad (3.2)$$

$$\tan \lambda_2 = \frac{h_T}{d_2 - d_1}$$

$$\lambda_2 = \arctan \left(\frac{h_T}{d_2 - d_1} \right)$$

$$\lambda_1 = 180 - \lambda_2$$

$$d_3 = \frac{h_T}{\sin \lambda_2} \quad (3.3)$$

Como se observa en la figura 3.7, la distancia d_2 es el lado mas pequeño del panel, el lado h_T es la altura total que tendría la estructura y es impuesta aleatoriamente. El valor h_T debe ser por conveniencia mayor que d_2 ya que de este valor depende el incremento de la radiación sobre el panel fotovoltaico.

3.3. Dimensiones de la estructura reflectiva.

Para el análisis, se debe tener en consideración los siguientes aspectos:

- Sombras entre los reflectores de la parte 1 y 2.
- Existen límites para la variación de los ángulos al que van orientados los reflectores.
- Dimensiones de los reflectores.

En la figura 3.8 se muestra las variables que conformarán esta parte del análisis de la estructura.

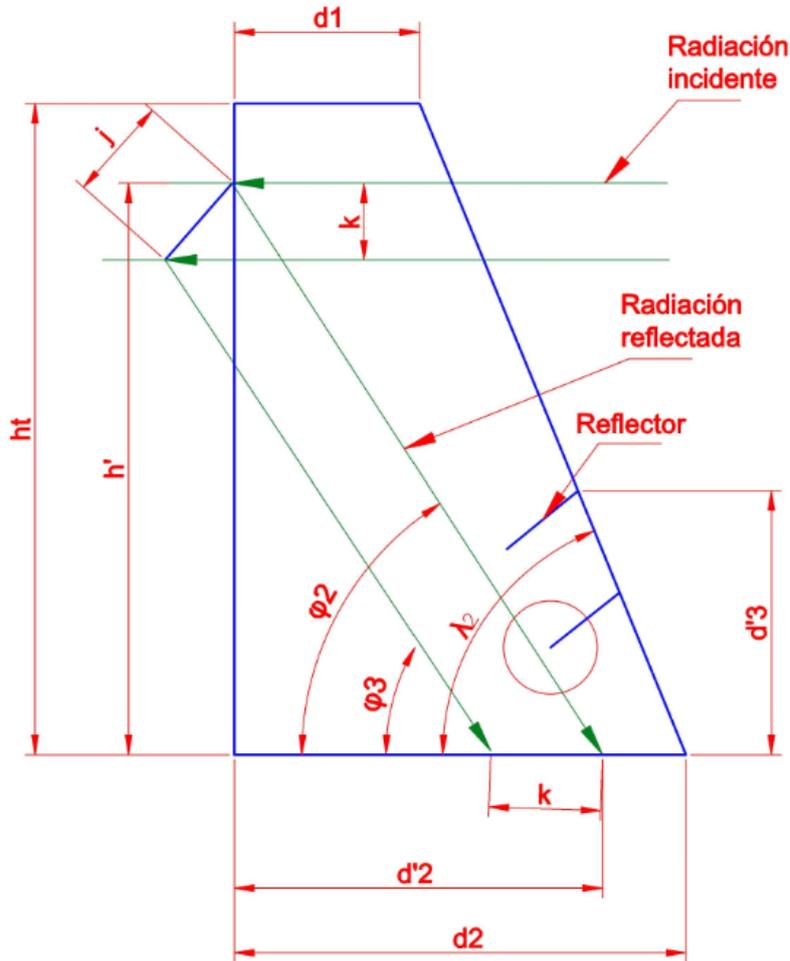


Figura 3.8: Detalles para el análisis de la parte 1.

El objetivo de este análisis es encontrar las dimensiones del reflector. Para garantizar que la radiación proyectada por el cristal de ancho ' j ' sobre el panel, no produzca sobras con respecto a los reflectores cercanos, se establece un límite máximo al que pueda ser orientado dicho reflector. Para ello, se calcula una distancia $d'2$ la cual corresponde a toda la distancia a la que puede incidir la radiación proyectada. La distancia restante $d_2 - d'2$ se obtiene al establecer una altura $d'3$ equivalente a 4 reflectores ubicados dos a cada lado de la estructura reflectiva. Teniendo en cuenta estas consideraciones, se procede a realizar el cálculo necesario.

$$d'_3 = 4m \sin \alpha$$

$$\tan \lambda_2 = \frac{d'_3}{d_2 - d'_2}$$

$$d_2 - d'_2 = \frac{d'_3}{\tan \lambda_2}$$

$$d'_2 = d_2 - \frac{4m \sin \alpha}{\tan \lambda_2}$$

Se calcula el ángulo al que incide la radiación proyectada sobre el panel (φ_2)

$$\tan \varphi_2 = \frac{h'}{d'_2}$$

$$h' = H_T - j \sin \alpha_2$$

$$\varphi_2 = \arctan \left(\frac{h'}{d'_2} \right)$$

Toda la radiación que incide sobre el panel proveniente de la parte 2, tiene el mismo ángulo de incidencia.

El ángulo de orientación del reflector se calcula:

$$\alpha_2 = 90 - \frac{\varphi_2}{2} \tag{3.4}$$

En la figura 3.9 se muestra una gráfica que permitirá facilitar el análisis.

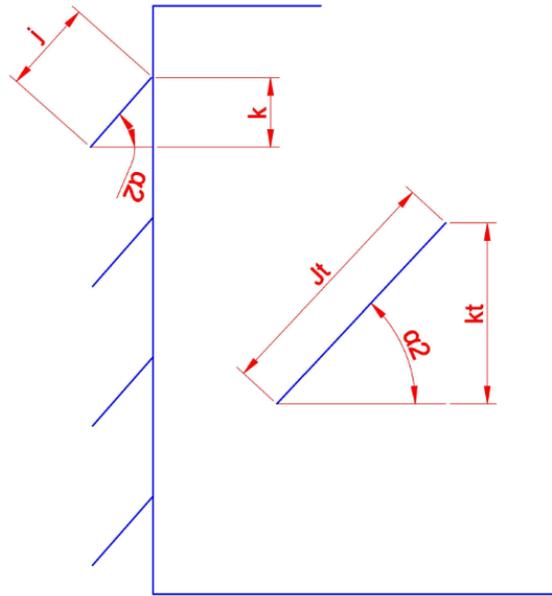


Figura 3.9: Simplificación del lado 1 para el análisis.

3.4. Deducción de Ecuaciones.

3.4.1. Parte I

Este análisis se divide en dos secciones. Para la primera sección se deben considerar los siguientes aspectos:

- Se determinarán dos ecuaciones que dependerán de la variación del ángulo de orientación de los reflectores.
- Se determinarán límites entre los cuales, la variación del ángulo satisfaga la ecuación en cuestión.
- Los límites en los que las ecuaciones serán válidas son:

$$\frac{\pi}{4} < x_1 < \frac{\pi}{2}$$

- Conociendo el ángulo óptimo al que deben ir orientados los reflectores, se dividen los límites antes mencionados para satisfacer las dos ecuaciones a utilizarse.

La primera ecuación que define el comportamiento del incremento de superficie conforme se varía el ángulo de orientación de los reflectores es la propuesta a continuación:

$$S_{1L_1} = a j n_1 \sin x_1 \sin(x_1 - \frac{\pi}{4})$$

De donde:

n_1 número de cristales en el lado 1 de la estructura

x_1 ángulo variable entre límites específicos

El valor de 'a' es una constante que depende de la superficie máxima que cubre este lado cuando los cristales están orientados a su ángulo óptimo. Se determina de la siguiente forma:

$$S_{1L_1} = a j n_1 \sin x_1 \sin \left(x_1 - \frac{\pi}{4} \right)$$

$$S_{1L_1} = \frac{H_T}{2}$$

$$x_1 = \alpha_2$$

Entonces:

$$\frac{H_T}{2} = a j n_1 \sin x_1 \sin \left(x_1 - \frac{\pi}{4} \right)$$

Cuando los reflectores están orientados de forma óptima, se obtiene la siguiente ecuación:

$$\frac{H_T}{2} = j n_1 \sin x_1$$

Se igualan las ecuaciones para obtener la constante "a"

$$a j n_1 \sin x_1 \sin \left(x_1 - \frac{\pi}{4} \right) = j n_1 \sin x_1$$

$$a \sin \left(\alpha_2 - \frac{\pi}{4} \right) = 1$$

$$a = \frac{1}{\sin \left(\alpha_2 - \frac{\pi}{4} \right)}$$

Los límites para la variación del ángulo x_1 son los siguientes:

$$\frac{\pi}{4} < x_1 < \alpha_2$$

Debido a que el ángulo tiene su variación entre ciertos límites, se procede a derivar la ecuación:

$$S'_{1L_1} = \frac{d(a j n_1 \sin x_1 \cdot \sin(x_1 - \frac{\pi}{4}))}{dx_{1_1}}$$

$$S_{1L_1} = \frac{1}{\sqrt{2}} a j n_1 \int_{\frac{\pi}{4}}^{\alpha_2} \cos x_{1_1} dx_{1_1} \int_{\frac{\pi}{4}}^{\alpha_2} (\sin x_{1_1} + \cos x_{1_1}) dx_{1_1} \quad (3.5)$$

Para los otros límites se utiliza otra ecuación la cual se expresa a continuación:

$$S_{2L_1} = b n_1 j \sin\left(\frac{\pi}{2} - x_{1_2}\right) (\sin \alpha_2 - \sin(x_{1_2} - \alpha_2))$$

Los límites para la variación de este ángulo son:

$$\alpha_2 < x_{1_2} < \frac{\pi}{2}$$

Derivando la ecuación anterior se obtiene:

$$S'_{2L_1} = \frac{d(b j n_1 \sin(\frac{\pi}{2} - x_{1_2}) \cdot (\sin \alpha_2 - \sin(x_{1_2} - \alpha_2)))}{dx_{1_2}}$$

Obteniendo como resultado:

$$S_{2L_1} = b j n_1 \int_{\alpha_2}^{\frac{\pi}{2}} -\sin x_{1_2} dx_{1_2} \cdot \left(\sin \alpha_2 - \int_{\alpha_2}^{\frac{\pi}{2}} \cos(x_{1_2} - \alpha_2) dx_{1_2} \right) \quad (3.6)$$

Para encontrar la variable "b" se hace el siguiente análisis:

$$S_{2L_1} = \frac{H_T}{2}$$

$$x_{1_2} = \alpha_2$$

Entonces:

$$\frac{H_T}{2} = b n_1 j \sin\left(\frac{\pi}{4} - x_{1_2}\right) (\sin \alpha_2 - \sin(x_{1_2} - \alpha_2))$$

$$b = \frac{1}{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_2\right)}$$

3.4.2. Parte II

Para esta parte de la estructura, se utilizan las mismas ecuaciones utilizadas en la parte 1. Los límites para la variación del ángulo $\Delta\alpha_2$ también se divide en dos partes: antes y después de pasar por α_2 . En la figura 6 se muestra el análisis para determinar el límite máximo.

Se pretende encontrar el ángulo β_1 , el cual representa el límite mínimo al que el ángulo de orientación de esos reflectores puede proyectar radiación. Para ello, se realiza el siguiente análisis.

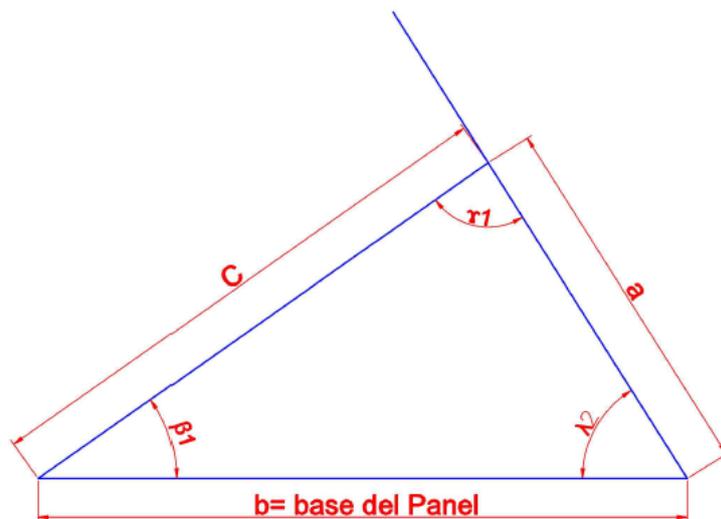


Figura 3.10: Análisis para la aplicación de la ley de cosenos .

Ley de cosenos [36]:

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos \lambda_2$$

$$a = \frac{H_T}{n \sin \lambda_2}$$

$$c = \sqrt{\left(\frac{H_T}{n \sin \lambda_2}\right)^2 + b^2 - 2\left(\frac{H_T}{n \sin \lambda_2}\right) b \cos \lambda_2}$$

Aplicando ley de senos [36]:

$$\frac{a}{\sin \beta_1} = \frac{c}{\sin \lambda_2}$$

$$\beta_1 = \arcsin\left(\frac{\frac{H_T}{n \sin \lambda_2} \cdot \sin \lambda_2}{c}\right)$$

$$\beta_1 = \arcsin\left(\frac{H_T}{nc}\right)$$

Entonces:

$$\gamma_1 = 180 - \lambda_2 - \beta_1$$

El límite mínimo sería:

$$\frac{\beta_1}{2}$$

En la figura 3.10 se muestra en análisis planteado para obtener el límite mínimo.

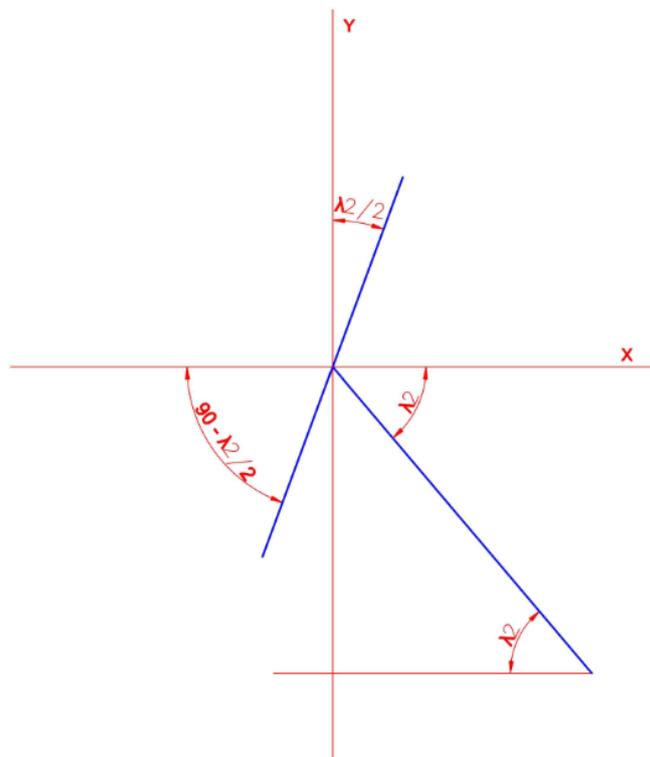


Figura 3.11: Análisis para obtener el límite máximo.

Quedando el límite:

$$\frac{\beta_1}{2} < \alpha < 90 - \frac{\lambda_2}{2}$$

Anteriormente, se determinó el ángulo óptimo al que deben estar orientado los reflectores. Con este dato, se divide el límite total en dos partes:

$$\frac{\beta_1}{2} < x_{2_1} < \alpha$$

$$\alpha < x_{2_2} < 90 - \frac{\lambda_2}{2}$$

Para esta parte, se usan las mismas ecuaciones usadas para el análisis de la parte 1, haciendo las sustituciones correspondientes.

La ecuación obtenida reemplazando el primer límite es:

$$S_{1L_2} = dn_2m \sin x_{2_1} \sin \left(x_{2_1} - \frac{\beta_1}{2} \right)$$

$$d = \frac{1}{\sin \left(\alpha - \frac{\beta_1}{2} \right)}$$

Derivando y reemplazando límites se obtiene:

$$S_{1L_2} = dn_2m \int_{\frac{\beta_1}{2}}^{\alpha} \cos x_{2_1} dx_{2_1} \cdot \int_{\frac{\beta_1}{2}}^{\alpha} \cos \left(x_{2_1} - \frac{\beta_1}{2} \right) dx_{2_1} \quad (3.7)$$

Reemplazando el segundo límite en la ecuación correspondiente se obtiene:

$$\alpha < x_{2_2} < 90 - \frac{\lambda_2}{2}$$

Entonces la ecuación sería:

$$S_{2L_2} = fn_2m \sin \left(90 - \frac{\lambda_2}{2} - x_{2_2} \right) (\sin \alpha_2 - \sin (x_{2_2} - \alpha_2))$$

Derivando y reemplazando límites se obtiene:

$$S_{2L_2} = fn_2m \int_{\alpha}^{90 - \frac{\lambda_2}{2}} -\cos \left(90 - \frac{\lambda_2}{2} - x_{2_2} \right) dx_{2_2} \left(\sin \alpha - \int_{\alpha}^{90 - \frac{\lambda_2}{2}} \cos (x_{2_2} - \alpha) dx_{2_2} \right) \quad (3.8)$$

El valor de "f" se obtiene:

$$f = \frac{1}{\sin \left(90 - \frac{\lambda_2}{2} - \alpha \right)}$$

3.5. Cálculo del factor de Incremento

Se considera como datos iniciales:

L_1 : Lado de menor dimensión del panel (cm)

L_2 : Lado de mayor dimensión del panel (cm)

Como se mencionó anteriormente, la altura del panel va a ser la variable principal para el factor de incremento de superficie. Por lo tanto, para incrementar la superficie se mantiene constante el lado menor del panel y la altura tiene que ser mayor al lado mayor del panel. De esta forma, obtenemos una relación que muestra el incremento de superficie el cual corresponde al factor de incremento de radiación que se necesita.

$$S_1 = L_1 \cdot L_2$$

La superficie con el incremento sería:

$$S_{inc} = L_1(n_2 m \sin \alpha + n_1 j \sin \alpha_2)$$

Entonces, el factor de incremento se obtiene:

$$F_{inc} = \left(\frac{S_{inc}}{S_1} - 1 \right) \cdot 100\%$$

Capítulo 4

Simulación y Orientación del Panel Fotovoltaico

4.1. Simulación en el software Simulink del panel Fotovoltaico

Con las ecuaciones del capítulo 2 y usando el software Matlab, se procede a realizar los cálculos necesarios para obtener la curva VI y PV del panel fotovoltaico.

En el cuadro 4.1 se muestran los datos estándares del panel a utilizar.

Marca del panel: Q.Antum

Modelo: Q.PEAK-G4.1 300

Cuadro 4.1: Datos del panel fotovoltaico Q.Antum [37].

Descripción	Nomenclatura	Valor
Potencia máxima	P_{MPP}	300 W
Corriente de cortocircuito	I_{SC}	9.77 A
Voltaje de circuito abierto	V_{OC}	39.76 V
Corriente en el punto máximo de potencia	I_{MPP}	9.26 A
Voltaje en el punto máximo de potencia	V_{MPP}	32.41 V
Eficiencia	η	18 %
Coefficiente de temperatura de I_{sc}	[%/k]	+0.04
Coefficiente de temperatura de PMPP	[%/k]	-0.39
Coefficiente de temperatura de V_{oc}	[%/k]	-0.28
Energía del semiconductor en su banda Gap	[Eg]	1.21 ± 0.08

Todas las ecuaciones para el modelado del panel FV con el respectivo incremento de radiación, han sido simuladas en Simulink de Matlab. A continuación, se muestran los

diagramas de bloques respectivos.

Corriente I0

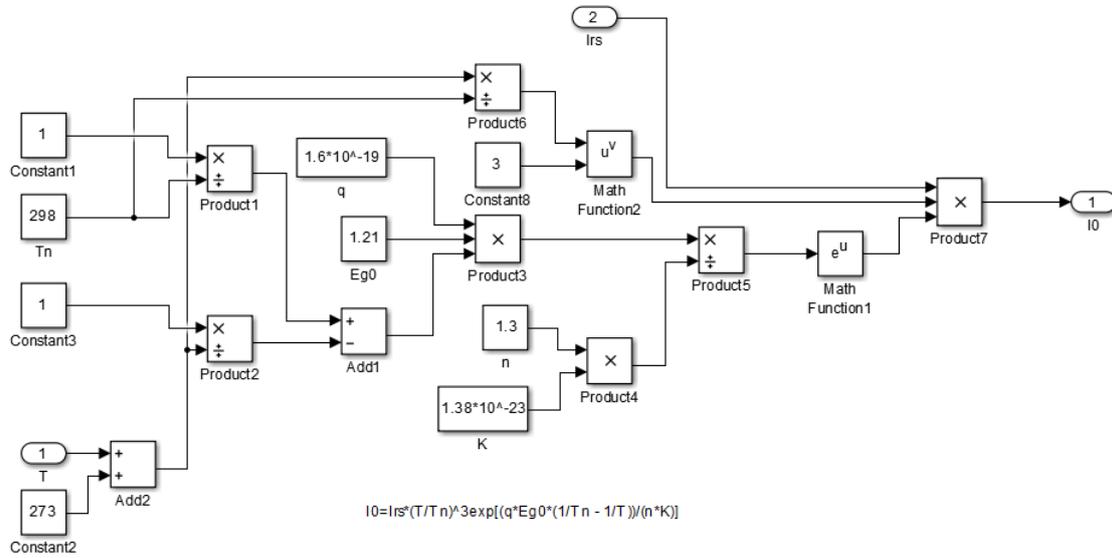


Figura 4.1: Diagrama de bloques en simulink para la corriente I0.

Corriente Irs

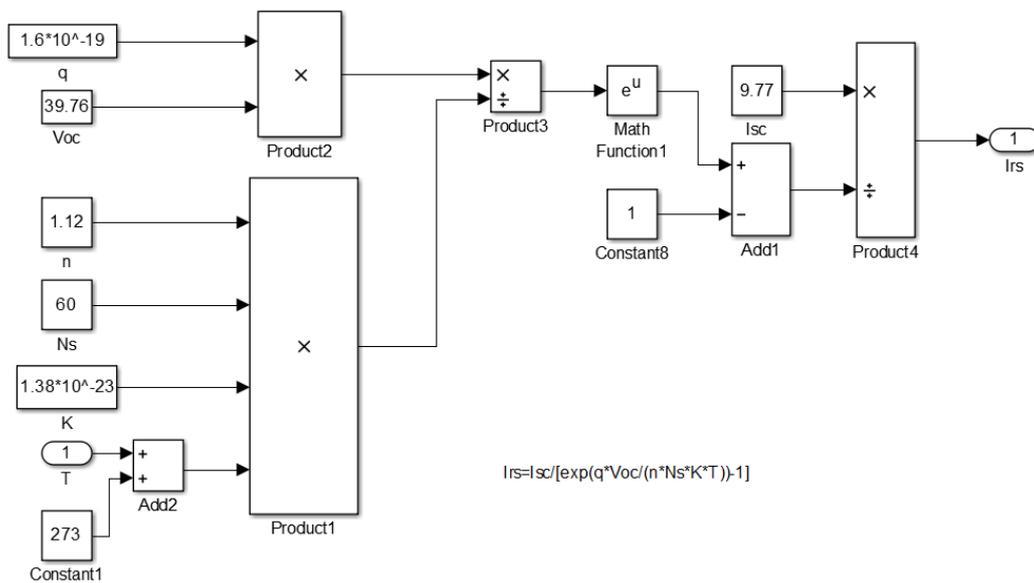


Figura 4.2: Diagrama de bloques en simulink para la corriente Irs.

Corriente Ish

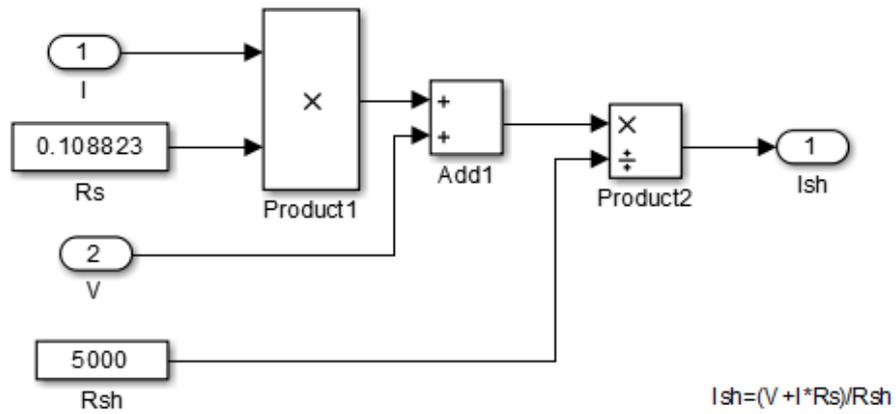


Figura 4.3: Diagrama de bloques en simulink para la corriente Ish.

Corriente Fotovoltaica

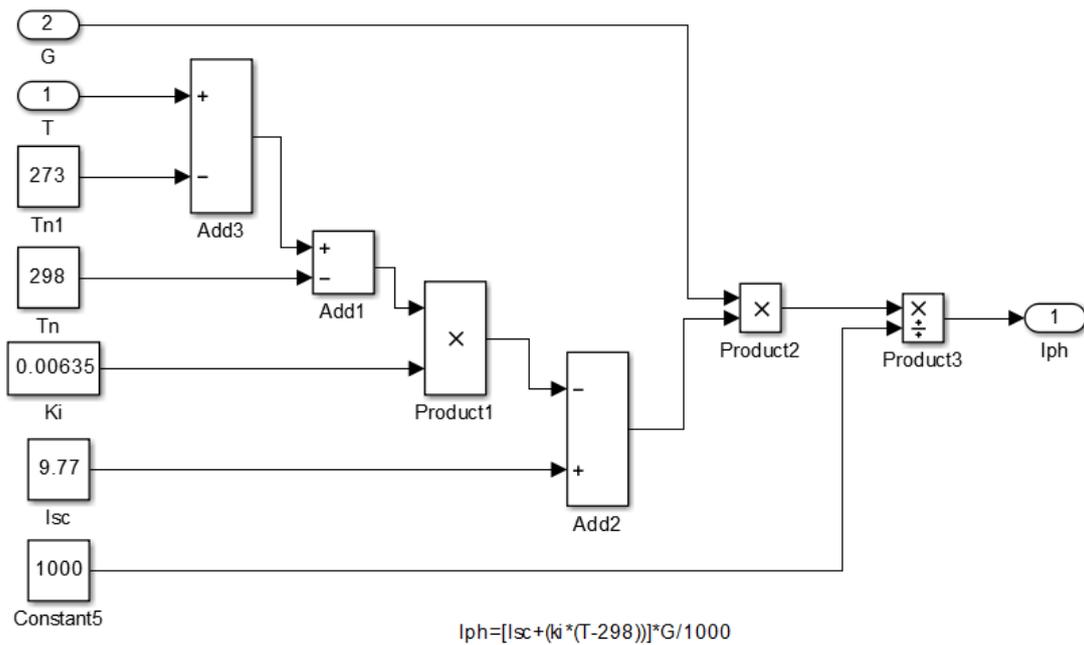


Figura 4.4: Diagrama de bloques en simulink para la corriente Iph.

Corriente del panel Ipv

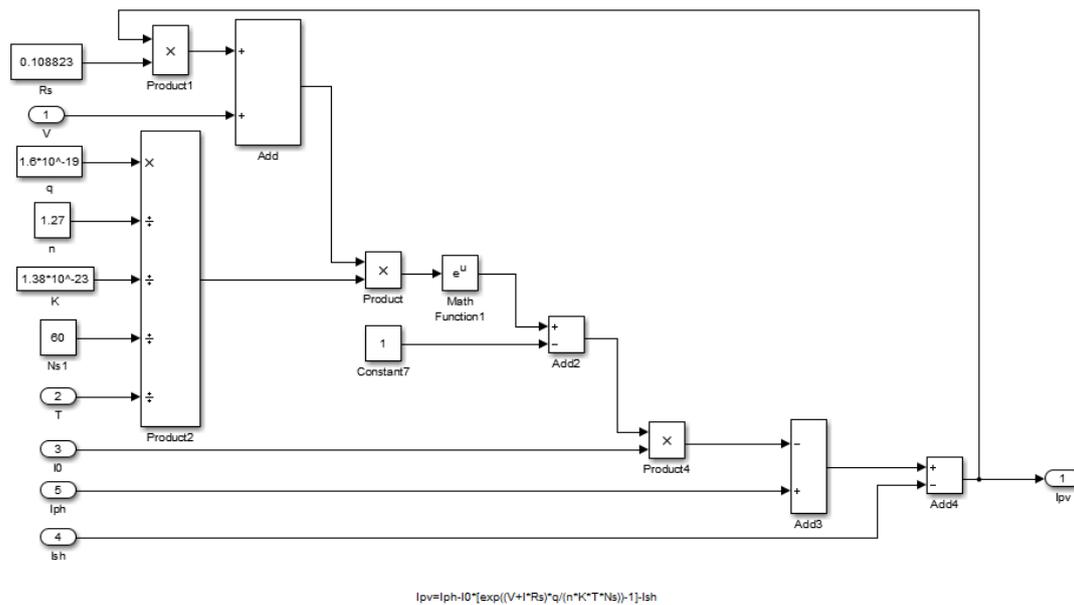


Figura 4.5: Diagrama de bloques en simulink para la corriente Ipv.

Variación de temperatura y radiación a la que el panel estará sometido dependiendo del incremento de radiación.

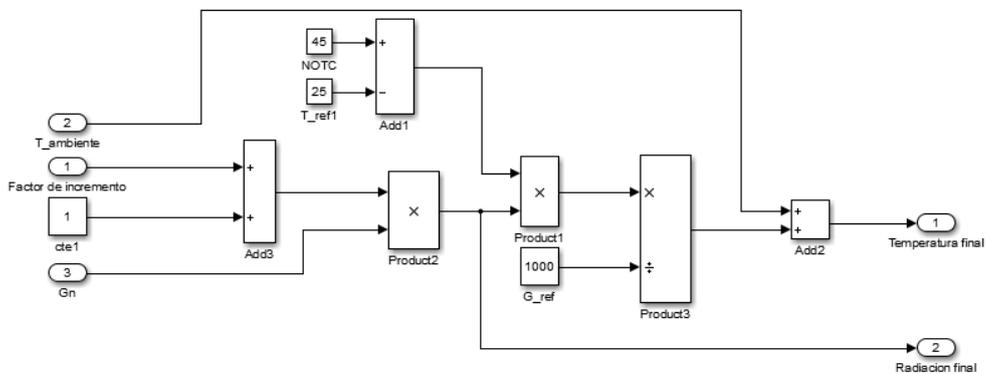


Figura 4.6: Diagrama de bloques en simulink para la corriente final del panel fotovoltaico.

Posteriormente, se conectan todos los subsistemas:

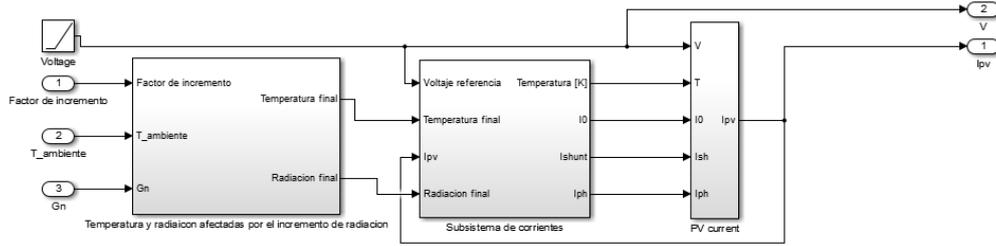


Figura 4.7: Diagrama de bloques en simulink para la corriente I0.

Finalmente, se obtiene un sistema donde se ingresa la temperatura ambiente, la radiación y el factor de incremento el cual es obtenido previamente a través del modelado matemático de la estructura reflectiva.

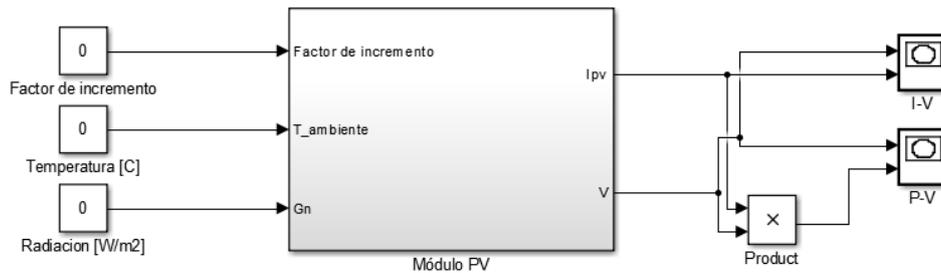


Figura 4.8: Diagrama de bloques en simulink para la corriente I0.

4.2. Orientación del Panel Fotovoltaico

En el sistema propuesto para el incremento de la radiación sobre el panel FV, se debe tener en cuenta que la radiación siempre debe incidir perpendicularmente sobre el panel. Por ello, necesariamente se debe acoplar a un sistema dinámico, es decir, se debe hacer uso de un seguidor solar de doble eje. En la figura 4.9 se muestra la instalación habitual de un sistema fotovoltaico usando un seguidor solar.

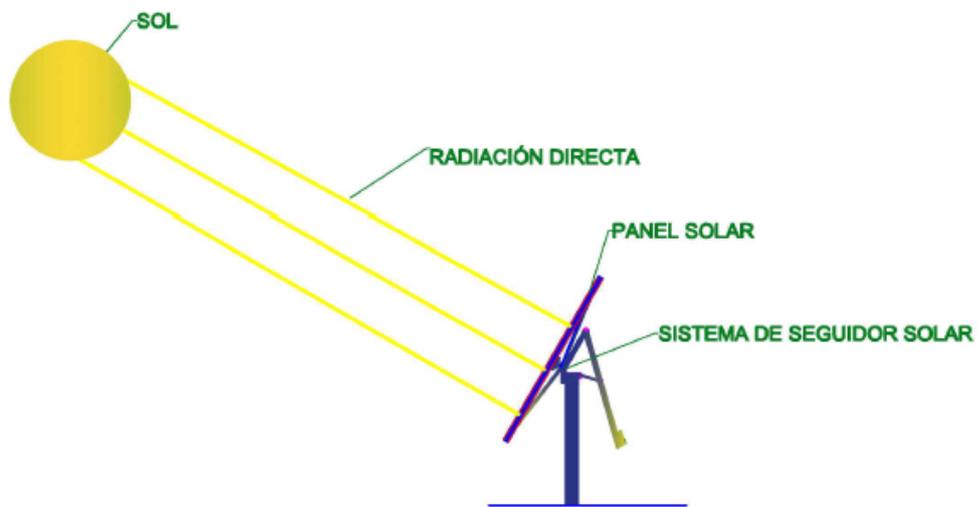


Figura 4.9: Sistema fotovoltaico usando un seguidor solar.

Debido a que el seguidor solar se ubica automáticamente donde existe más radiación, no es necesario realizar cálculos de orientación, como se observa en la figura 4.10

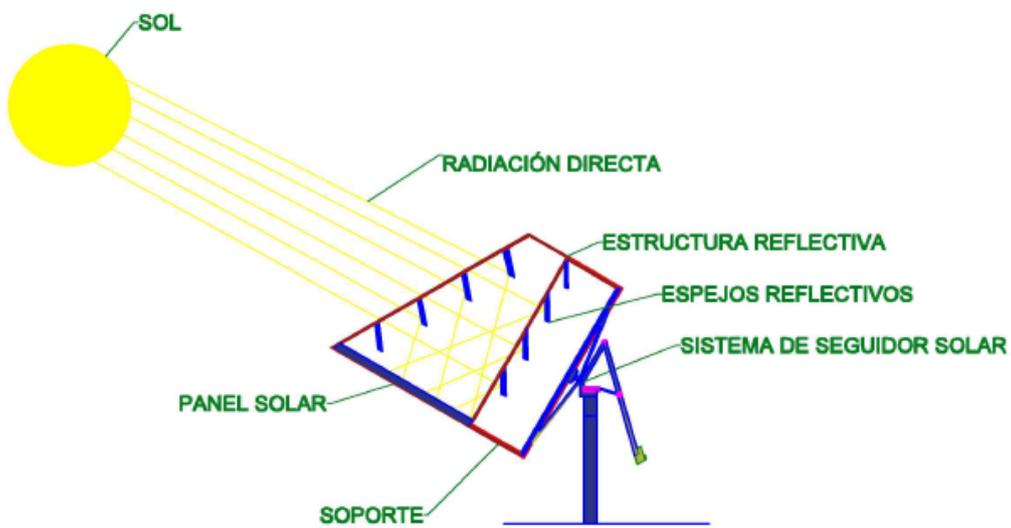


Figura 4.10: Acople de la estructura propuesta usando un seguidor solar.

Capítulo 5

Análisis de Resultados

5.1. Análisis del modelo matemático

Se realizó un código en Matlab para graficar las ecuaciones y comprobar su validez. En la figura 5.1 se muestran los datos de entrada que se requieren para el modelado matemático:

El formulario, titulado "Ingresar datos", contiene cuatro filas de campos de entrada con sus respectivos valores y unidades:

Altura de la estructura	195	cm
Número de reflectores	10	cm
Lado mayor del panel	167	cm
Lado menor del panel	120	cm

Debajo de los campos de entrada se encuentran dos botones: "CALCULAR" y "BORRAR".

Figura 5.1: Datos de entrada.

En la figura 5.2, se muestran los parámetros calculados a través del modelado matemático para obtener las dimensiones óptimas de cada elemento de la estructura reflectiva.

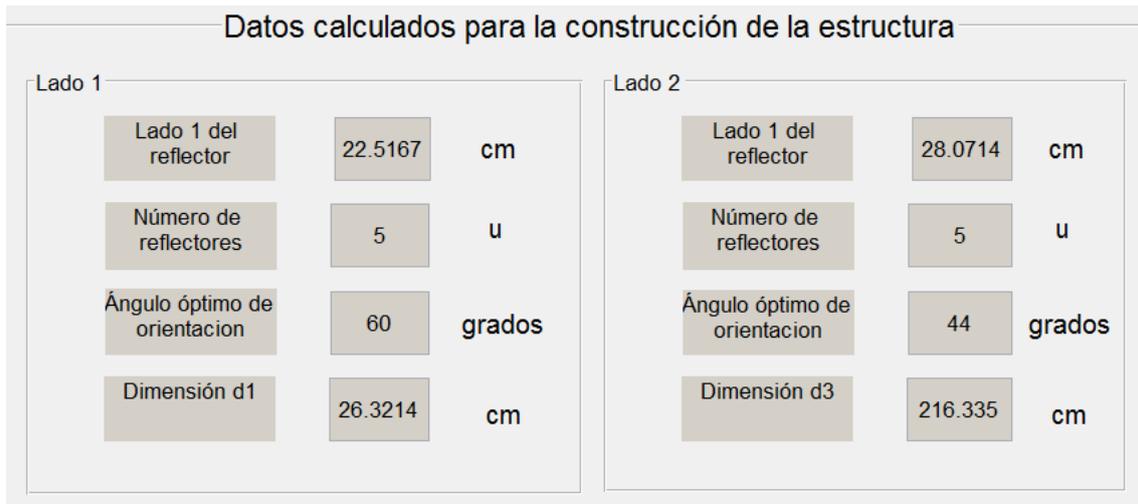


Figura 5.2: Dimensiones calculadas para la construcción y orientación de cada elemento de la estructura reflectiva.

En la figura 5.3 se muestran las curvas obtenidas al simular las ecuaciones del lado 1 de la estructura reflectiva. Estas ecuaciones corresponden la número 18 y 19.

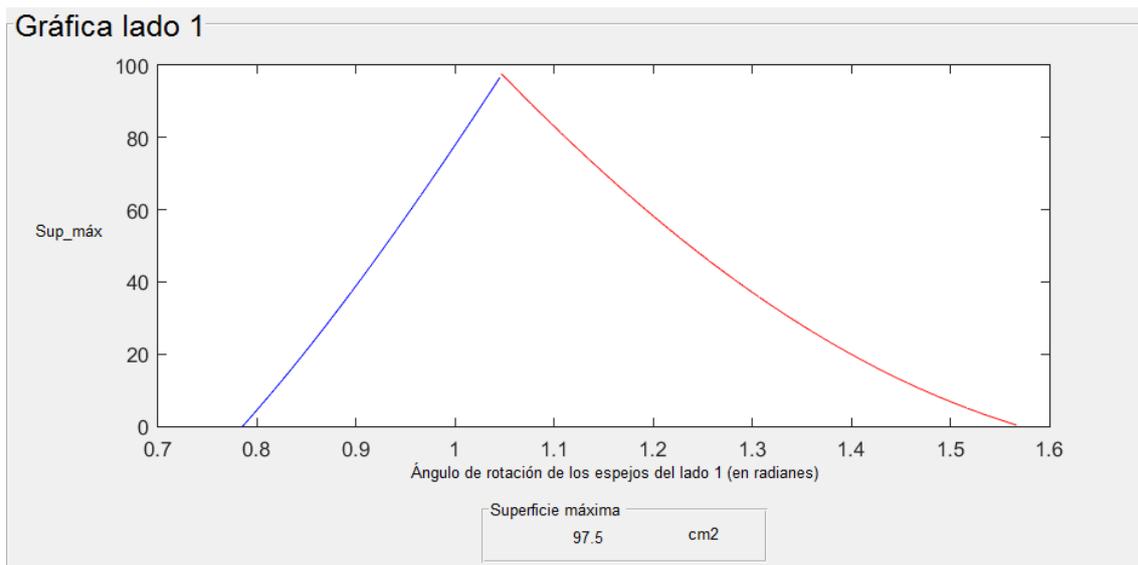


Figura 5.3: Gráficas correspondientes al lado uno de la estructura

En la figura 5.4 se muestran las curvas obtenidas al simular las ecuaciones del lado 1 de la estructura reflectiva. Estas ecuaciones corresponden la número 20 y 21.

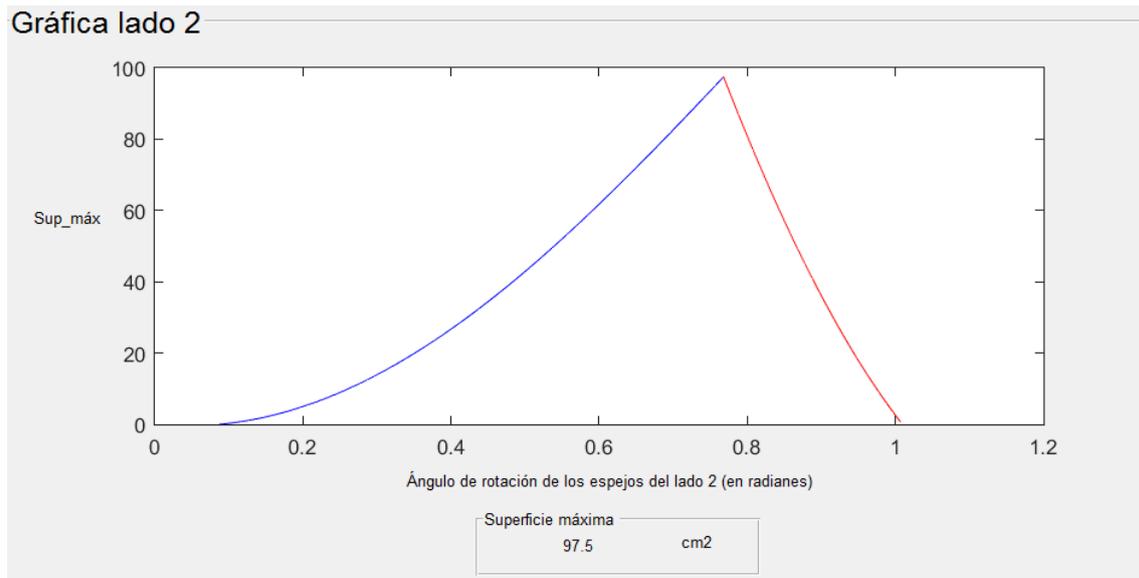


Figura 5.4: Gráficas correspondientes al lado dos de la estructura

El punto máximo que se observa en las figuras 5.3 y 5.4 respectivamente, corresponden al ángulo óptimo de orientación al que deben ser colocados los reflectores en cada uno de los lados de la estructura reflectiva. Si el ángulo de orientación es diferente de éste, la radiación proyectada sobre el panel se reduce por efectos de sombra y poca captación de radiación incidente por los reflectores.

5.2. Análisis del modelado del panel fotovoltaico.

Para garantizar los resultados del sistema agregando el factor de incremento, se ha realizado simulaciones variando temperatura y radiación. Estas variaciones se realizan en el software Matlab-Simulink y se obtienen las gráficas que se muestran a continuación:

Voltaje vs Corriente

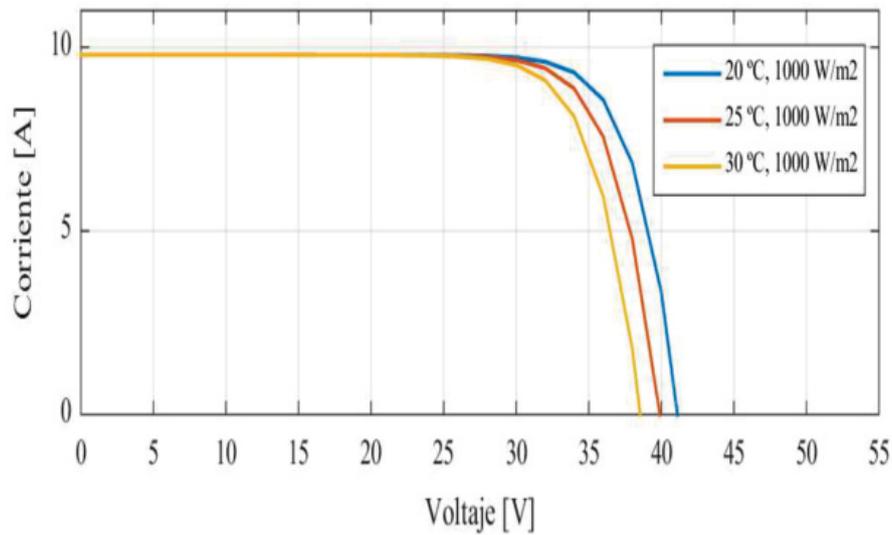


Figura 5.5: Radiación constante y temperatura variable.

Se observa que la corriente se mantiene constante y el voltaje varía en aproximadamente 1 voltio, dependiendo de la temperatura con respecto a la condición estándar del panel. Con una temperatura de 20°C, el voltaje se incrementó 1 voltio aproximadamente y con una temperatura de 30°C, la temperatura se redujo en la misma proporción.

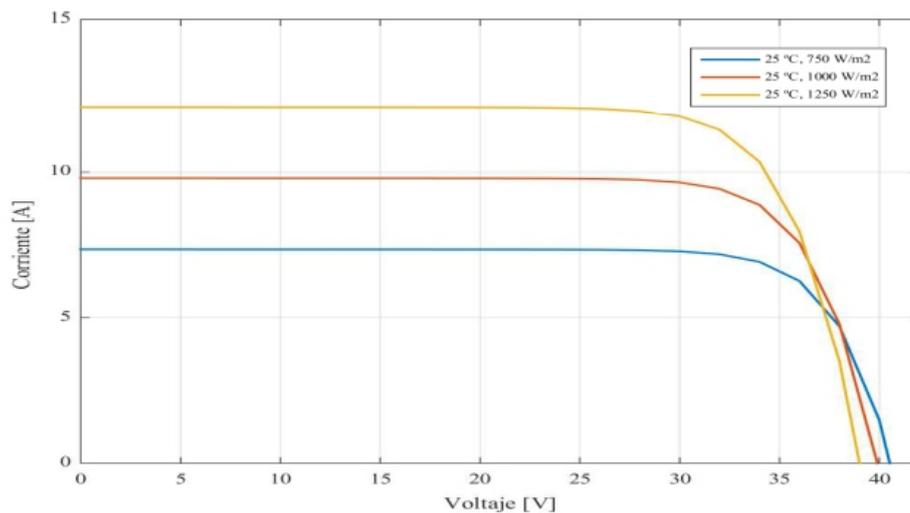


Figura 5.6: Temperatura constante y radiación variable.

A diferencia del análisis de la figura 5.5, manteniendo constante la temperatura y variando la radiación, se observa que la corriente se ve afectada considerablemente y el voltaje a

su vez muestra variaciones mínimas. Esto indica un incremento en la potencia final del panel, siempre y cuando la temperatura se mantenga lo más reducida posible.

Voltaje vs Potencia

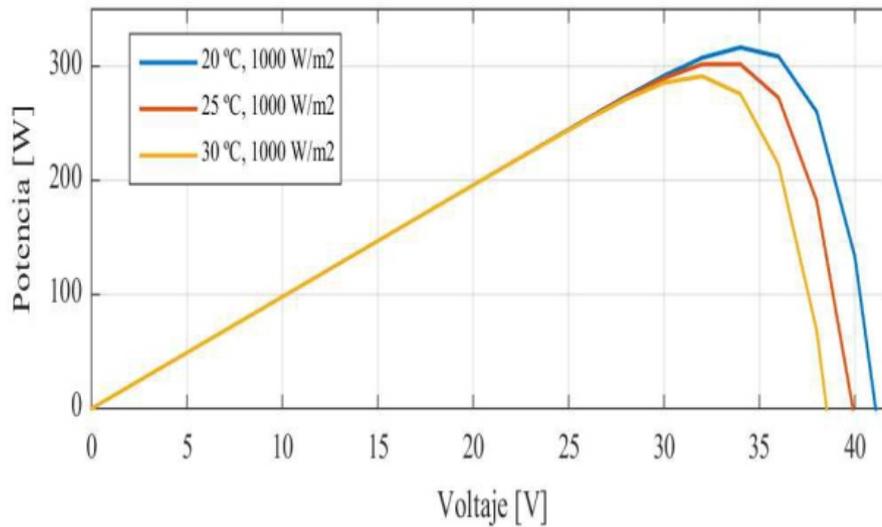


Figura 5.7: Radiación constante y temperatura variable.

Al mantener la radiación constante y variando la temperatura, se observa que el punto de máxima potencia es mayor si se trabaja en bajas temperaturas.

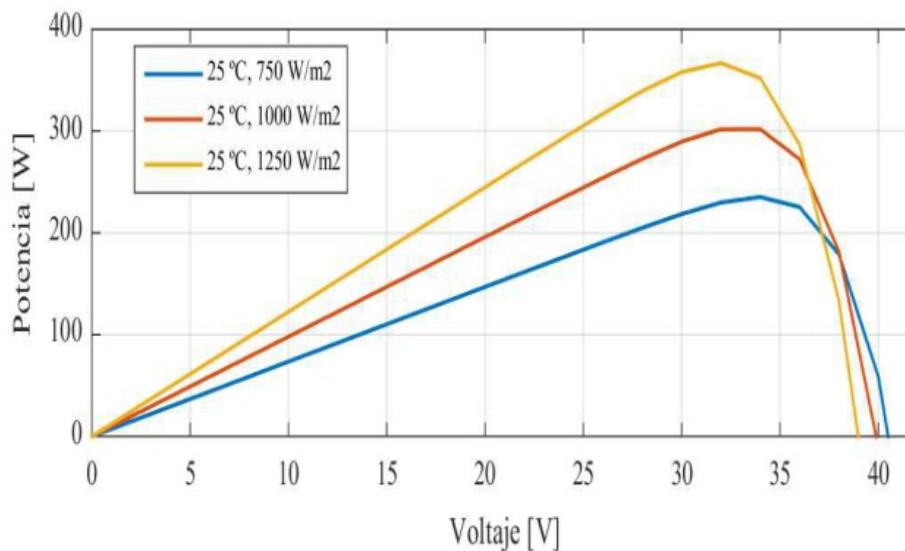


Figura 5.8: Temperatura constante y radiación variable.

Al mantener constante la temperatura y variando la radiación, el punto de máxima potencia se incrementa considerablemente en el caso de tener una radiación mas elevada. Así

mismo, el voltaje en estos casos varía en 1 voltio aproximadamente.

Voltaje vs Potencia con factor de Incremento en condiciones Estándares

En la gráfica 5.9 se observan los resultados obtenidos al simular el panel en condiciones estándares agregando el factor de incremento $F_i = 0,6$ obtenido previamente.

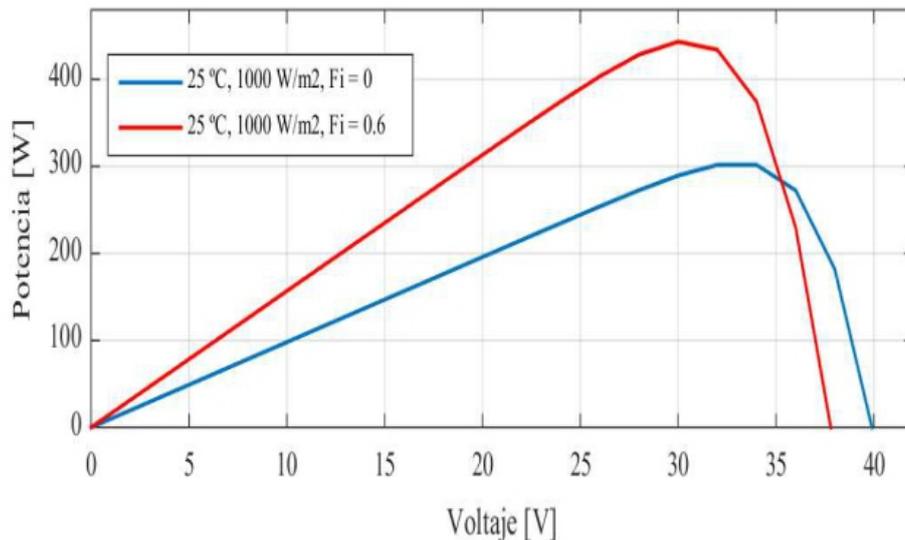


Figura 5.9: Voltaje vs Potencia con factor de Incremento en condiciones Estándares.

Debido a que se está simulación se realizó en condiciones estándares, se ha encontrado que el incremento de la potencia corresponde a un 40%. Esta reducción con respecto al factor de incremento equivalente al 60%, se debe a que el panel estaría trabajando a una temperatura superior a la estándar y por ende, la eficiencia del panel se reduce.

Voltaje vs Potencia con factor de Incremento en condiciones Reales

Considerando el clima en cuenca y basándonos en datos registrados por la estación meteorológica ubicada en la Universidad Politécnica Salesiana, se ha considerado una radiación media de 500 W/m² y una temperatura media de 16°C. Estos datos han sido ingresados en la simulación junto con el factor de incremento obtenido el cual se registró: $F_i = 0,6$. El resultado se observa en la figura 5.10.

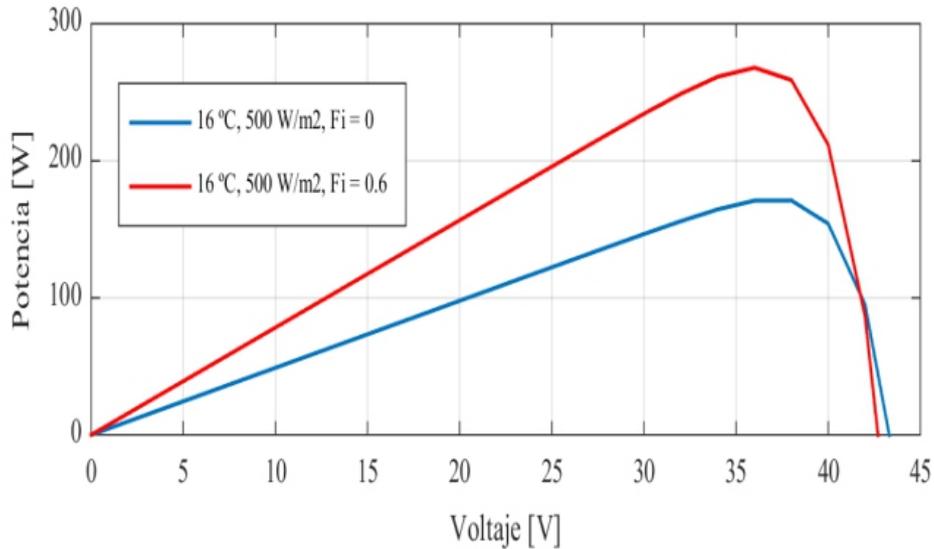


Figura 5.10: Voltaje vs potencia con factor de incremento en condiciones reales.

El pánel seleccionado en condiciones estándares, garantiza una potencia de 300W pico. En condiciones reales, se obtiene una potencia de aproximadamente 170W y agregando el factor de incremento, se observa que la potencia se incrementó hasta 270W aproximadamente. Esto indica un incremento de potencia del 60% el cual corresponde al factor de incremento obtenido en el modelamiento de la estructura reflectiva. Cabe recalcar que el factor de incremento, no se vio afectado debido a que se está trabajando con una temperatura inferior a la estándar. Con temperaturas superiores a la estándar, este factor de incremento se reduce y los resultados esperados en cuanto a potencia no serían considerables.

5.3. Análisis Energético y Costos

La implementación de la estructura propuesta indica un costo adicional de fabricación y de instalación, el cual corresponde a un factor económico muy importante si en algún momento se opta por instalar el sistema. A continuación, se muestran tablas donde se indica los costos finales en la instalación de sistemas fotovoltaicos estáticos, con seguidor solar y con la estructura reflectiva.

En el cuadro 5.1, se muestra los datos iniciales correspondientes a precios, potencias y demás datos requeridos para la instalación.

Cuadro 5.1: Datos iniciales [38, 39].

Descripción	Seguidor Solar	Panel Solar
Marca	Dura TraKDA	cs6k-285wp
Capacidad	3-4 Kw	285 Wp
Capacidad de Paneles	12	-
Costos (\$)	1298	185,90
Vida Útil (años)	15	

En el cuadro 5.2, se establecen los costos de inversión para la implementación para un sistema estático con 12 paneles, un sistema con seguidor solar con 12 paneles y el sistema propuesto donde se usa el mismo seguidor solar, 9 paneles y la estructura reflectiva.

Cuadro 5.2: Costos de implementación.

Cantidad	Descripción	V. Unit.	V. Total
1	Seguidor solar	1298	1298
12	Panel Solar	185,89	2230,75
1	Mano de obra instalacion (Sin reflector)	905,75	905,75
1	Estructura Reflectiva	540	540
1	Mano de obra instalacion (Con reflector)	1013,75	1013,75
1	Mano de obra sin seguidor y sin reflector	846,15	846,15
1	Costo de mantenimiento sin seguidor y sin reflector	500	500
1	Costo de mantenimiento con seguidor y sin reflector	800	800
1	Costo de mantenimiento	1000	1000

En el cuadro 5.3, se muestran los costos de inversión para implementar cada uno de los sistemas antes mencionados.

Cuadro 5.3: Inversión final en cada caso (Las siglas 'SS' hacen referencia al 'Seguidor Solar').

Total 1 neto	5234,51 \$	Sin estructura reflectiva
Total 2 neto	6082,51 \$	Con estructura reflectiva
Total 3 neto	3576,91 \$	Sistema de 12 paneles estático

Se observa que el costo de implementar un sistema con seguidor solar es mayor en comparación con un sistema fotovoltaico estático y a su vez, la implementación con la estructura reflectiva y el seguidor solar es aún mayor. Considerando un análisis económico durante 1 año, se obtienen resultados más adecuados. En el cuadro 5.4 se muestran estos resultados.

Cuadro 5.4: Energía obtenida en 1 año y el precio equivalente.

Tipos	HSP (H/día)	P. Total (Wp)	E. Gen (Wh/día)
Sistema Estático	4,76	3420	16282,62
Sin reflector + Seguidor	4,76	4617	21981,54
Reflector + Seguidor	4,76	5367,26	25553,54
Tipos	E. Gn (KWh/día)	Kwh (\$)	Cost Anual (\$)
Sistema Estático	5943,16	0,10	594,32
Sin reflector + Seguidor	8023,26	0,10	802,33
Reflector + Seguidor	9327,04	0,10	932,70

En el cuadro 5.5, se muestra un análisis económico equivalente a los 15 años de vida que se espera de la instalación.

Cuadro 5.5: Utilidad en cada caso durante el tiempo de vida de la instalación.

Tipos	Tiempo de recuperación de la inversión /años)	Tiempo en el que se obtiene ingresos (años)	Ingresos totales en el tiempo de vida útil (\$)
Sistema Estático	6,02	8,98	5337,83
Sin reflector + Seguidor	6,52	8,48	6800,38
Reflector + Seguidor	6,52	8,48	8465,74

Por último, se hace un análisis de lo que costaría obtener la energía generada por el sistema propuesto con respecto a una instalación estática. En el cuadro 5.6, se muestran los resultados obtenidos.

Cuadro 5.6: Costo de la implementación de un sistema estático para obtener la misma energía que se obtiene con el sistema propuesto.

Energía requerida con sistema estático	25553,54 Wh/día
Número de paneles requeridos	18,83
Energía obtenida al año	9327,04 KWh/año
Costo total del sistema	6193,19 \$
Utilidad generada al año	932,70 \$
Tiempo de recuperación de la inversión	6,64 Años
Utilidad generada en el tiempo de vida restante	7797,37 \$

Los resultados mostrados en el cuadro 5.6, indica que la utilidad generada en el tiempo de vida útil de la instalación, es prácticamente la misma que al implementar el sistema propuesto. La desventaja del sistema estático es que ocupa el doble del espacio que el requerido para el sistema propuesto.

Si la implementación del sistema propuesto se hace a gran escala, las ventajas económicas empiezan a tener peso con respecto a lo habitual.

Capítulo 6

Conclusiones y Recomendaciones

Los sistemas fotovoltaicos están en gran auge eléctrico, en especial en zonas alejadas donde la red de distribución eléctrica no puede llegar, por lo cual en países en desarrollo resulta factible porque se puede usar para el accionamiento de sistemas de bombeo y riego, además su instalación no es muy compleja lo que le hace accesible para personas que tengan conocimientos básicos en electrotécnica e instalaciones eléctricas.

La implantación del sistema propuesto no presenta ventajas económicas representativas a lo largo de toda su vida útil (15 años), pero sí representa ahorro en terreno ya que al ser comparado con un sistema fotovoltaico estático, el sistema propuesto ocupa solo la mitad. Este ahorro de terreno podría permitir desarrollar otro sistema propuesto y de esta manera, la ventaja económica comenzaría a ser considerada.

Las dimensiones de la estructura reflectiva propuesta deben ser analizadas acorde a las del seguidor solar que se pretende usar. En el análisis realizado en esta tesis, se ha considerado un seguidor solar capaz de abarcar 12 paneles de ciertas dimensiones con una potencia total de hasta 4 kW , permitiendo de esta forma dimensionar la estructura reflectiva para que se acople al seguidor solar. Por ello, se ha usado 9 paneles de los 12 que puede contener, distribuyéndolos de cierta forma que todo el sistema (9 paneles y la estructura) se acoplen adecuadamente al seguidor solar.

La estructura reflectiva propuesta no contiene un análisis mecánico. Si en algún momento se requiere implementar esta estructura para obtener valores reales, se debería hacer un estudio mecánico de la misma, de tal forma que se pueda garantizar su estabilidad e integridad ante cualquier anomalía atmosférica.

El factor de incremento encontrado (60%) se reduce si se trabaja en zonas de altas temperaturas, ya que el incremento de radiación sobre la superficie del panel afecta directamente a la temperatura esta a su vez, afecta a la potencia final del panel. Por esta razón, no se

recomienda implementar esta estructura en zonas donde se tienen temperaturas superiores a la temperatura estándar del panel.

Los cálculos realizados en esta tesis, son basados en las condiciones atmosféricas de la ciudad de Cuenca en cuanto a su temperatura y radiación solar, permitiendo obtener resultados aceptables tanto energética como económicamente.

El modelado matemático de la estructura reflectiva permite determinar cuanta superficie se puede incrementar para captar suficiente radiación solar, de tal forma que pueda ser proyectada sobre el panel sin que se presenten problemas de sombra. Además, se han planteado ecuaciones que permiten obtener las dimensiones específicas de todos los materiales que se requieren para construir un prototipo.

Bibliografía

- [1] C. Bustamante, B. Mirabá, “Puntos Calientes en Paneles Fotovoltaicos,” 2018.
- [2] J. C. V. de Kuyper y S. R. Morales, Fuentes de energía, renovables y no renovables: aplicaciones. Alfaomega, 2014.
- [3] C. Jara and P. Galarza, “Simulación y evaluación de sistemas fotovoltaicos residenciales conectados a la red eléctrica,” 2015.
- [4] W. G. Jacho, “Análisis y modelamiento del impacto de la radiación difusa en la generación eléctrica usando paneles solares fotovoltaicos policristalinos,” 2014.
- [5] M. A. Abella, “Dimensionado de Sistemas Fotovoltaicos autónomos,” 2015.
- [6] O. M. Deleg and C. J. Uguña, “Análisis de la curva de demanda de potencia eléctrica de red debido a la incorporación de generación fotovoltaica en el edificio Cornelio Merchán de la universidad Politécnica Salesiana,” 2016.
- [7] O. Á. Hernández, T. Montaña, and J. M. Correa, “La radiación solar global en la provincia de Loja , Evaluación preliminar utilizando el método de Hottel,” pp. 25–31, 2014.
- [8] N. R. Flores and M. Á. Domínguez, “Medición de la eficiencia energética de los paneles solares de silicio,” 2015.
- [9] S. Lanza, “Física Moderna,” pp. 2–7, 2015.
- [10] N. E. F. Moreno and J. E. F. Martínez, Física Moderna Edicion Revisada. Pearson Educación, 2007.
- [11] J. Romero, “Análisis del funcionamiento de paneles fotovoltaicos y su utilización en las regiones de la costa y sierra del Ecuador. Caso de estudio: Biblioteca Pompeu Fabra de Mataró,” 2015.
- [12] I. R. Morocho and K. S. Ríos, “Estudio técnico para incorporar generación distribuida fotovoltaica en el sector residencial del cantón Cuenca,” 2015.

- [13] D. A. Alvarez, “Evaluación de la orientación y el ángulo de inclinación óptimo de una superficie plana para maximizar la captación de irradiación solar en Cuenca-Ecuador,” 2017.
- [14] N. X. Recalde and F. J. Prieto, “Diseño e implementación de un sistema fuzzy-pid para el control del ángulo de inclinación del panel solar monocristalino de 30 watt,” 2014.
- [15] M. Osorio, “Modelado y simulación de celdas y paneles solares,” October, 2013.
- [16] C. R. L and S. S. G, “Sistema para caracterización de paneles fotovoltaicos,” vol. 1, pp. 42–46, 2015.
- [17] J. Aller, J. Viola, J. Restrepo, and A. Ginart, “Explicit Model of PV Cells considering Variations in Temperature and Solar Irradiance,” no. 2, pp. 3–6, 2016.
- [18] J. E. Cata and F. M. Rodríguez, “Análisis matemático de un panel solar fotovoltaico de silicio,” 2015.
- [19] J. Aller, J. Viola, J. Restrepo, A. Ginart, and A. Salazar, “Implicit PV Cell Parameters Estimation used in Approximated Closed-Form Model for Inverter Power Control,” pp. 0–5, 2017.
- [20] F. C. Romero, “Cálculo de la Temperatura de Operación de Células Solares en un Panel Fotovoltaico Plano,” 2002.
- [21] J. R. Wilcox, “Solar Cell Temperature Dependent Efficiency and Very High Temperature Efficiency Limits,” 2013.
- [22] M. Martins de Oliveira Junior, D. Oliveira Filho, and A. Ribeiro, “Modelagem e estudo de concentradores solares planos,” no. July, 2016.
- [23] V. J. Fesharaki, M. Dehghani, and J. J. Fesharaki, “The Effect of Temperature on Photovoltaic Cell Efficiency,” no. November, pp. 20–21, 2011.
- [24] G. Lizaso, L. Landini, I. Kuri, A. Bonino, D. Fernández, and J. Petrosino, “Simulación de superficies corrugadas para el control de reflexiones sin dispersión,” 2018.
- [25] Y. S. Khoo, T. Reindl, A. G. Aberle, and S. Member, “Optimal Orientation and Tilt Angle for Maximizing in-Plane Solar Irradiation for PV Applications in Singapore,” vol. 4, no. 2, pp. 647–653, 2014.
- [26] Panel Solar, ¿Cómo Calcular Cuánta Energía Produce?, [En línea]. Disponible en: <https://gstrium.com/2013/03/17/panel-solar-como-calcular-cuanta-energia-produce> [Accedido: 17-mar-2013].

- [27] J. A. Duffie, W. A. Beckman, and J. O'Brien, *Procesos térmicos en energía solar*. Grupo Cero, 1979.
- [28] G. Lizaso, L. Landini, I. Kuri, A. Bonino, D. Fernández, and J. Petrosino, "Simulación de superficies corrugadas para el control de reflexiones sin dispersión," 2018.
- [29] P. V. Sapién and G. R. Chavarría, "Transferencia de calor en un concentrador solar," 2010.
- [30] M. Ronnelid, "The use of corrugated booster reflectors for solar collector fields," vol. 65, no. 6, pp. 343–351, 1999.
- [31] E. Jiménez Rodríguez, "Análisis energético de un concentrador solar de una estufa solar urbana," 2013.
- [32] J. M. Murillo, "Análisis termodinámico de una estufa sola con concentradores de espejos planos," 2002.
- [33] B. Modeling, R. W. Andrews, A. Pollard, and J. M. Pearce, "Photovoltaic System Performance Enhancement With Nontracking Planar Concentrators : Experimental Results and Bidirectional Reflectance Function Photovoltaic System Performance Enhancement With Non-Tracking Planar Concentrators: Experimental Results and Bi-Directional Reflectance Function (BDRF) Based Modelling," no. October, 2015.
- [34] A. Escobar, M. Holguín, and J. Osorio, "Diseño e implementación de un seguidor solar para la optimización de un sistema Fotovoltaico.," no. 44, pp. 245–250, 2010.
- [35] D. Arrieta, S. Puello, "Diseño y Construcción de un seguidor solar para aumentar el rendimiento energético en paneles fotovoltaicos de un sistema de bombeo," 2015
- [36] W. A. Granville, J. S. Mikesh, y P. F. Smith, *Trigonometría plana y esférica: con tablas trigonométricas*. Unión Tipográfica Editorial Hispano-americana, 1992.
- [37] Q. Antum, "Data Sheet Módulo Solar Q.peak-g4.1 300-310," 2015.
- [38] CanadianSolar Módulo solar CS6K-285P 285Wp, solar-pur AG. [En línea]. Disponible en: <https://www.solar-pur.com/products/canadian-solar-cs6k-285p-285wp-solarmodul-1>. [Accedido: 19-mar-2019].
- [39] 3 kW 2 Eje Seguidor Solar Sistema Seguidor Solar Con Galvanizado En Caliente - Buy Sistema Solar De Doble Eje Tracker,2 Ejes Rastreador Solar,2 Ejes Rastreador Solar Product on Alibaba.com, www.alibaba.com. [En línea]. Disponible en: [//www.alibaba.com/product-detail/3kw-2-axis-tracker-solar-system_60783663758.html](http://www.alibaba.com/product-detail/3kw-2-axis-tracker-solar-system_60783663758.html). [Accedido: 19-mar-2019].