

**UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS**  
**(Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA)**  
**DIRECCIÓN GENERAL DE ESTUDIOS DE POSGRADO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y**  
**GEOGRÁFICA**  
**UNIDAD DE POSGRADO**



**TESIS**

**“CONFIGURACIÓN DE UN SISTEMA COLECTOR SOLAR DE INCIDENCIA  
INDIRECTA PARA GENERAR ENERGÍA TÉRMICA EN CONDICIONES  
CLIMATOLÓGICAS DE HUANCAYO-PERÚ”**

**PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE DOCTOR EN CIENCIAS  
AMBIENTALES**

**PRESENTADO POR:  
MG. WUILBER CLEMENTE DE LA CRUZ**

**DR. ALEJANDRO ALCÁNTARA BOZA  
ASESOR**

**LIMA – PERÚ  
2022**

**AGRADECIMIENTO**

A CONCYTEC-FONDECYT, por el financiamiento de la investigación en el marco de la convocatoria E041-01 [número de contrato 76-2018-FONDECYT-BM-IADT-MU].

A los doctores de la Unidad de Pos Grado de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, por impartir su sapiencia.

**DEDICATORIA**

A la memoria de Roque, mi padre, quién me inculcó y condujo a ser una persona del bien.

A Manuela, mi madre, por su incesante forja y paciencia.

A Patricia y Claudia, mis hijas, por ser las promotoras de mi autorrealización.

## INDICE GENERAL

LISTA DE TABLAS.....	v
LISTA DE FIGURAS .....	vi
RESUMEN .....	viii
ABSTRAC .....	ix
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Situación problemática .....	1
1.2 Formulación del problema de investigación.....	4
Problema General.....	4
Problemas específicos.....	4
1.3 Justificación teórica .....	5
1.4 Justificación práctica .....	5
1.5 Objetivos .....	6
Objetivo General.....	6
Objetivos específicos .....	6
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO .....	7
2.1 Antecedentes de investigación .....	7
2.2. Bases teóricas.....	12
2.2.1 Colector solar de Incidencia Indirecta .....	12
2.2.2 Conversión térmica de la radiación solar concentrada.....	18
2.2.3 Evaluación de la radiación solar .....	21
2.2.4 Metodología de diseño.....	22
2.2.5 Energía Térmica .....	28
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA.....	31
3.1 Tipo y diseño de investigación.....	31
3.2 Unidad de Análisis.....	32
3.3 Población de Estudio.....	32
3.4 Tamaño de la Muestra.....	32
3.5 Selección de la Muestra .....	33
3.6 Técnicas de Recolección de Datos.....	33
3.7 Técnicas de Análisis de Datos.....	35
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	36
4.1 Parámetros meteorológicos del lugar (Radiación solar y temperatura).....	36
4.1.1 Radiación directa.....	37
4.1.2 Radiación Difusa.....	39

4.1.3 Características meteorológicas .....	41
4.2 Dimensionamiento del sistema colector solar de incidencia indirecta. ....	44
4.2.1 Descripción de las necesidades.....	44
4.2.2 Requisitos para el diseño .....	45
4.2.3 Diseño conceptual.....	47
4.2.4 Solución conceptual.....	48
4.2.5 Evaluación de variantes de la solución principal.....	49
4.3 Configuración definitiva .....	51
4.3.1 Dimensionamiento del Helióstato.....	51
4.3.2 Dimensionamiento del atenuador .....	52
4.3.3 Dimensionamiento del Concentrador .....	53
4.3.4 Dimensionamiento del Receptor .....	56
4.3.5 Construcción del prototipo. ....	57
4.3.6 Montaje de los componentes del sistema solar de incidencia indirecta. ....	60
4.4 Definición de factores y niveles para el diseño factorial $2^k$ .....	60
4.5 Matriz de datos para el diseño factorial $2^3$ . ....	62
4.6 Representación gráfica de resultados de la investigación .....	65
4.7 Análisis de Varianza.....	68
4.8 Prueba de hipótesis.....	68
4.9 Análisis e interpretación de los resultados.....	77
4.10 Discusión de los resultados .....	81
CONCLUSIONES.....	85
RECOMENDACIONES .....	86
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	87
ANEXOS. ....	93
ANEXO 01: Disposición General del SSII.....	94
ANEXO 02: Dimensionamiento del Helióstato .....	95
ANEXO 03: Dimensionamiento del atenuador.....	96
ANEXO 04: Parábola .....	97
ANEXO 05: Dimensionamiento del concentrador de disco .....	98
ANEXO 06: Dimensionamiento del receptor.....	99

## LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1: Diseño factorial $2^3$ .....	31
Tabla 3.2 Ficha de registro de datos .....	33
Tabla 4.1: Resumen de la caracterización de la radiación directa y difusa de onda corta .....	41
Tabla 4.2; Necesidades para el diseño de un sistema solar de incidencia indirecta.....	44
Tabla 4.3; Lista de requisitos para el diseño del sistema .....	45
Tabla 4.4: Atributo, funciones y principios tecnológicos del SSII.....	47
Tabla 4.5: Matriz morfológica del SSII.....	48
Tabla 4.6; Evaluación técnica de las soluciones .....	49
Tabla 4.7; Evaluación económica de las soluciones .....	50
Tabla 4.8; Características geométricas de resistencia del Helióstato .....	51
Tabla 4.9: Parámetros de diseño calculados del concentrador solar de disco .	55
Tabla 4.10: Configuración de factores y niveles.....	60
Tabla 4.11; Matriz de diseño factorial y notación geométrica.....	61
Tabla 4.12 Estimación de las interacciones .....	61
Tabla 4.13: Datos de radiación y temperaturas para ocho combinaciones .....	63
Tabla 4.14: Matriz de datos para el diseño factoria.....	65
Tabla 4.15: Prueba de hipótesis específica 01.....	69
Tabla 4.16: Prueba de hipótesis específica 02 (Evaluación técnica).....	69
Tabla 4.17: Prueba de hipótesis específica 02 (Evaluación económica).....	70
Tabla 4.18: Prueba de hipótesis con análisis de varianza.....	71
Tabla 4.19: Resumen del modelo.....	77

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Diagrama de los diferentes tipos de hornos .....	13
Figura 2.2: Componentes de un horno solar .....	14
Figura 2.3: Funcionamiento del Helióstato .....	15
Figura 2.4: Vector de proyección de un horno solar .....	16
Figura 2.6: Piranómetro para medir radiación directa-difusa y Pirheliómetro ...	22
Figura 2.7; Proceso de diseño según VDI 2221 .....	22
Figura 2.8; Proceso de diseño.....	23
Figura 2.9; Método de diseño y sus fases .....	24
Figura 2.10; Método de diseño y sus actividades de cada fases .....	27
Figura 3.1: Configuración del Helióstato (H), Atenuador (A) y el Concentrador parabólico (CP) .....	32
Figura 3.2: Instrumentos utilizados en la investigación .....	35
Figura 4.1; Proceso de medición de la radiación directa y difusa.....	36
Figura 4.2; Radiación solar directa en W/m <sup>2</sup> de doce meses (junio 2018-julio 2019) .....	38
Figura 4.3; Radiación solar difusa en W/m <sup>2</sup> de doce meses (junio 2018-julio 2019) .....	40
Figura 4.4. Variación de la radiación solar directa y difusa a lo largo del mes de junio 2019.....	40
Figura 4.5. Variación de la temperatura máxima y mínima .....	42
Fig. 4.6: Variación de la temperatura en un día-anual.....	43
Fig. 4.7: Variación de la humedad del aire .....	43
Fig. 4.8: Variación de la velocidad del aire .....	44
Fig. 4.9: Función general del SSII .....	47
Fig. 4.10: Solución principal del SSII, utilizando la combinación de la tabla 4.5 .....	49
Fig. 4.11: Comparación de las calificaciones técnicas y económicas .....	50
Fig. 4.12: Ángulos de elevación de solsticio y equinoccio en el Valle del Mantaro .....	51
Fig. 4.13: Forma geométrica del helióstato con dos grados de libertad .....	52
Fig. 4.14: Forma geométrica del atenuador .....	53
Figura 4.15: Perfil geométrico del concentrador.....	54

Figura 4.16: Vista de sección del disco parabólico.....	54
Figura 4.17: Concentrador de disco parabólico.....	56
Figura 4.18: Estructura del receptor del sistema solar de incidencia indirecta.	57
Figura 4.19: Prototipo del concentrador solar de disco .....	58
Figura 4.20: Prototipo del Helióstato. ....	58
Figura 4.21: Prototipo del atenuador .....	59
Figura 4.22: Prototipo de la estructura del receptor. ....	59
Figura 4.23: Montaje-componentes del sistema solar de incidencia indirecta..	60
Figura 4.24: vista geométrica del diseño factorial $2^3$ .....	62
Figura 4.25: Disposición de los componentes del sistema para la medición....	63
Figura 4.26; Normalidad de los datos.....	65
Figura 4.27; Homogeneidad de los datos en base a residuos y el helióstato...	66
Figura 4.28; Homogeneidad de los datos en base a residuos y el atenuador ..	66
Figura 4.29; Homogeneidad de los datos en base a residuos y el concentrador .....	67
Figura 4.30; Orden de observación .....	67
Figura 4.31; Diagrama de Pareto de efectos estandarizados.....	73
Figura 4.32; Efectos principales .....	74
Figura 4.33; Efectos de la interacción. ....	75
Figura 4.34; Efectos estandarizados significativos y no significativos.....	75
Figura 4.35; Efectos estandarizados significativos y no significativos.....	76
Figura 4.36; Diagrama de optimización.....	76

## RESUMEN

La energía solar en el contexto global viene desarrollándose bajo una tendencia ascendente por ser amigable con el medio ambiente, y por otorgar dos vertientes; las fotoeléctricas y las térmicas, este último se está aprovechando mayormente a baja temperatura, sin embargo, tiene la oportunidad de extenderse a media y alta temperatura, para esto, se inició con desarrollar una investigación en un contexto específico del Perú que es el Valle del Mantaro. El propósito de esta investigación fue configurar los componentes de un sistema solar de incidencia indirecta que consiste; en un Helióstato, un atenuador, un concentrador y un receptor, con el fin de generar energía térmica de alta temperatura que supere a los 200°C en el foco del concentrador. Para lograr este propósito, se acudió a diversas bases de datos como Scopus, Sciencedirect, Web of Science, Springer y repositorios a fin de obtener artículos, patentes y tesis; los mismos que proporcionaron información para la fundamentación de esta investigación. El método que se ha utilizado fue el sistémico, debido a que se abordó el tema interrelacionando los componentes de manera holística, el tipo de investigación fue aplicada y el nivel al que se ha llegado es el experimental. El diseño que se ha implantado en esta investigación fue el factorial  $2^3$ , debido a que se manipularon variables como; helióstato, atenuador y concentrador; cada uno a dos niveles (bajo y alto), teniendo como variable respuesta a la temperatura en el absorbedor (en el foco del concentrador).

El resultado que se obtuvo fue una temperatura máxima de 215.6°C en el absorbedor con una combinación de factores; ángulo de elevación del helióstato a 40°, sin atenuador y con ángulo de elevación 0° del concentrador, es decir, ángulo focal horizontal, los tres factores a nivel bajo, mientras que la temperatura mínima que fue de 141.7 °C cuando los tres factores estuvieron al nivel alto. Además en la investigación se ha demostrado que los factores más significativos fueron el heliostato y el concentrador independientemente.

### **Palabras clave:**

Energía solar, alta temperatura, helióstato, concentrador solar, absorbedor, incidencia indirecta

**ABSTRAC**

Solar energy in the global context has been developing under an upward trend for being friendly to the environment, and for providing two aspects; photoelectric and thermal, the latter is being used mostly at low temperatures, however, it has the opportunity to extend to medium and high temperatures, for this, it began with developing an investigation in a specific context of Peru that is the Valle del Mantaro. The purpose of this research was to configure the components of an indirect incidence solar system consisting of; in a Heliostat, an attenuator, a concentrator and a receiver, in order to generate high-temperature thermal energy that exceeds 200°C at the focus of the concentrator. To achieve this purpose, various databases such as Scopus, Sciencedirect, Web of Science, Springer and repositories were used in order to obtain articles, patents and theses; the same ones that provided information for the foundation of this investigation.

The method that has been used was the systemic one, due to the fact that the subject was approached by interrelating the components in a holistic way, the type of research was applied and the level that has been reached is the experimental one. The design that has been implemented in this research was the factorial 2<sup>3</sup>, due to the fact that variables such as; heliostat, attenuator and concentrator; each one at two levels (low and high), having as a variable response to the temperature in the absorber (at the focus of the concentrator).

The result obtained was a maximum temperature of 215.6°C in the absorber with a combination of factors; angle of elevation of the heliostat at 40°, without attenuator and with angle of elevation of 0° of the concentrator, that is, horizontal focal angle, the three factors at low level, while the minimum temperature was 141.7 °C when the three factors were at a high level. In addition, the investigation has shown that the most significant factors were the heliostat and the concentrator independently.

**Keywords:**

Solar energy, high temperature, Heliostat, Solar concentrator, absorber, indirect incidence

## CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

### 1.1 Situación problemática

En el contexto global, el desarrollo de las energías renovables se halla bajo una tendencia ascendente, sobre todo en estas últimas dos décadas, tal es así, a principios de 2011 al menos 118 países tenían políticas de apoyo a las energías renovables o algún tipo de objetivo o cuota a nivel nacional, muy por encima de los 55 países que los tenían en 2005 (Renewable Energy 21, 2018). Actualmente, “las energías renovables vienen sustituyendo de manera parcial a los combustibles fósiles y a la energía nuclear, en cuatro mercados; generación de electricidad, aplicaciones térmicas como; calor para procesos industriales, calefacción, refrigeración y producción de agua caliente en el sector doméstico” (André, de Castro y Cerdá, 2009, p. 12). Asimismo, están siendo utilizados en “carburantes para transporte y servicios energéticos sin conexión a red en el ámbito rural de países en vías de desarrollo” (André, de Castro y Cerdá, 2009, p.12). El 2015 fue un año de primicias, y de gran importancia para el desarrollo de las energías renovables, tal es así, en la 21ª Conferencia de las Partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas, sobre el Cambio Climático (COP 21) en París, convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático (UNFCCC), “195 países acordaron limitar el calentamiento global por debajo de los dos grados centígrados; comprometiéndose así la gran mayoría de países a incrementar el uso de la energía renovable y la eficiencia energética” (REN 21, 2018, p.4), del mismo modo esto fue corroborada por la COP 22 desarrollada en Marrakech (Marruecos), con el acuerdo “nutrir el Acuerdo de París para que se desarrolle con fuerza dando lugar a un clima más estable y a un desarrollo sostenible y climáticamente resiliente” (COP 22, 2016, p 2); es más, establecen la implantación de un “Programa Mundial sobre Energía Renovable y Eficiencia Energética, con la idea de facilitar medios para llevar a cabo las acciones cooperativas necesarias para “descarbonizar” el mundo y dar a todos los habitantes del planeta acceso a una energía sostenible (COP 22, 2016, p.5). Asimismo, se tiene un acuerdo en la COP 23 desarrollado en Bonn Alemania, 2017, en el que plantean medidas para promover la innovación y el despliegue de tecnologías eficientes y bajas en

carbono ya existentes, como las subvenciones a las energías renovables, impuestos diferenciados a los vehículos; apoyo a I + D; promoción de la investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías de baja emisión de carbono (Centro de estudios Internacionales GILBERTO BOSQUES, 2017, p.60). Para cumplir estas exigencias es necesario difundir el uso de las energías renovables, particularmente la energía solar que es amigable con el medio ambiente. Sin embargo, en el mundo existen indicadores de crecimiento del uso de energías renovables en la generación de electricidad y calor, tal es así, en los años 2014 y 2015, muchos países desarrollaron la energía solar fotovoltaica como solar térmica de concentraciones, ellos son: “Marruecos (160 MW), Sudáfrica (150 MW) y Estados Unidos (110 MW); quienes construyeron nuevas instalaciones de energía solar térmica de concentración en línea, elevando la capacidad total mundial alrededor de un 10%, cerca de 4.8 GW” (REN 21, 2016).

Al final del año 2015, la capacidad de energía solar de Concentración (CSP) estaba en construcción, “en Marruecos (350 MW), Sudáfrica (200 MW), Israel (121 MW), Chile (110 MW), Arabia Saudita (100 MW), China (50 MW) e India (25 MW), lo que refleja un cambio desde los mercados tradicionales (España y Estados Unidos) hacia regiones con altos niveles de radiación directa normal” (REN 21, 2016, p.8).

Sin embargo, el consumo mundial de energía está en base a los combustibles fósiles en un 78.3%, mientras que las energías renovables tiene presencia con 19.2% y la nuclear con 2.5%. De los 19.2%, el 8.9% es Biomasa tradicional y el 10.3 % es energía renovable moderna (Biomasa, solar, geotérmica, hidráulica, eólica y biocombustibles); entre Biomasa, Geotérmica y calor solar hacen su representatividad en un 4.2%, el hidráulico en 3,9% y la eólica, solar para alta temperatura en 1.4% y Biocombustibles en 0.8% (REN 21, 2016).

La presencia de las energías renovables, en la generación de energía eléctrica tiene una tendencia ascendente, aunque es incipiente, tal es así, el uso de las energías no renovables es de 76.3% y la electricidad renovables es de 23.7%, de éste último el que se impone es la hidráulica con 16.6%,

luego la eólica con 3.7%, la bioenergía con 2.0%, la fotovoltaica con 1.2% y entre Geotérmica, Concentrador solar parabólico y Oceanía solo el 0.4% (REN 21, 2016). Esto indica que a nivel mundial el desarrollo de la tecnología de Concentradores solares parabólicos para la generación de energía es aún incipiente, por tanto, hay necesidad de profundizar e investigar sus atributos y bondades por ser una tecnología amigable con el ambiente.

En el contexto nacional, Perú es un país privilegiado, posee diversos tipos de energías renovables tales como: Hidráulica, Solar, Eólica, Mareomotriz, Geotérmica y Biomasa; sin embargo, la matriz energética está en base a combustibles fósiles en un 46%, Gas natural 27%, Biomasa 13%, Hidroenergía 11% y carbón 4%, y las otras renovables no figuran (Gamio, 2016).

Sin embargo, la participación de las energías renovables en la generación de energía eléctrica a diciembre del año 2014, fue; 3.12%(eólico 0.61%, solar a baja temperatura 0.48%, Biogás 0.07%, Bagazo 0.35%, Hidroeléctrica menores a 20 MW 1.61%), los mismos que están distribuidas en el norte, centro y sur, generando una potencia efectiva de 8 717.8 MW de energía (Comité de operación económica del sistema interconectado nacional-Coes Sinac, 2016).

Con fines de mitigar la generación exorbitante del Gas de Efecto Invernadero por parte de las organizaciones industriales, Mineras, comerciales y domésticos, es necesario fomentar el uso de las energías renovables e insertar con mayor énfasis en la matriz energética peruana, toda vez que es amigable al medio ambiente. El Perú tiene recursos renovables potencialmente explotables, tal es así, en hidráulica tenemos para desarrollar unos 69 937 MW, eólica 22 500 MW, Solar 25 000 MW, Biomasa 900 MW y Geotérmica 3 000 MW (Coes Sinac, 2016). Esto implica mayor interés y desarrollo de investigaciones tecnológicas para su aprovechamiento y utilidad en diferentes organizaciones.

En efecto, la región Junín posee diversos tipos de energías renovables como: Hidráulica, Solar, Eólica, Geotérmica y Biomasa, entre ellos, los que más

resaltan son los hidráulicos y solares, sin embargo; no se está aprovechando de manera efectiva las bondades de éstas. En particular, en Huancayo la radiación solar es significativo, en épocas de verano llega a unos 6.5 kWh/m<sup>2</sup>xdía en promedio (Instituto Geofísico de Huayao, 2016), el mismo que debe ser aprovechado en aplicaciones diversas (Electrificación rural, electrificación conectado a red, bombeos solares, calentamiento de agua, micro climatizaciones entre otros), todos ellos a baja temperatura. Su potencialidad está dada para ser aprovechada en la generación de energía térmica de media y alta temperatura, superiores a los 100°C; es decir, la energía de media temperatura está considerada de 100°C a 200°C y los de alta temperatura superiores a 250°C(Riveros-rosas, 2014), cuya aplicación podría ser industrial; a esto se centra la iniciativa de la investigación. A la fecha, el desarrollo de las energías renovables es muy baja, solo se utiliza la solar térmica a baja temperatura (calentamiento de agua) lográndose así unos 3935 termas instaladas, 4140 fotovoltaicos aislados, 131 secadores solares y 79 cocinas solares en la región Junín (Coes Sinac, 2016), pero ningún sistema para generación de energía de alta temperatura.

Como podemos apreciar, a nivel regional y nacional no existe ningún estudio relacionado al aprovechamiento de la radiación solar para la generación de energía térmica de alta temperatura, sin embargo, existen estudios en otros países del mundo los que guiaron metodológicamente en la solución del problema.

## **1.2 Formulación del problema de investigación**

### **Problema general**

¿Cómo configurar un sistema Colector solar de incidencia indirecta con fines de generar energía térmica de alta temperatura en condiciones climatológicas de Huancayo Perú?

### **Problemas específicos**

- ¿Cómo determinar los parámetros medio ambientales del lugar; radiación solar, temperatura, presión atmosférica y la densidad, que permite dimensionar el sistema colector solar de incidencia indirecta?

- ¿Cómo dimensionar los componentes del sistema colector solar de incidencia indirecta, con fines de realizar el experimento?
- ¿Cómo evaluar la disposición de los componentes del sistema solar de incidencia indirecta, con fines de generar energía térmica de alta temperatura?

### **1.3 Justificación teórica**

La razón fundamental para desarrollar la investigación es; demostrar que la radiación solar a condiciones sobre los 3 200 m.s.n.m. se puede aprovechar para generar energía térmica de alta temperatura de unos 200 °C a más, todo ello, en un receptor de agua o sal. Si se logra demostrar la generación de energía térmica por encima de los 200°C, éste tendría múltiples usos, tal como; la generación de energía eléctrica u otros procesos industriales, sin utilizar combustibles fósiles, por tanto sin generar contaminación ambiental. La metodología a utilizar fue el sistémico, bajo el enfoque del diseño factorial  $2^k$ , esto implica hacer experimentos manipulando variables independientes bajo dos niveles. El desarrollo de la investigación se fundamenta en un soporte teórico basado en principios termodinámicos, transferencia de calor, óptica y diseño; ellos nos orientaron y condujeron hasta la formulación científica de la hipótesis, a partir de éste, se inició con la concreción, que implica el desarrollo práctico de la investigación, hasta la obtención de los resultados finales

### **1.4 Justificación práctica**

Esta investigación nos permitió desarrollar conceptos de diseño, radiación, convección y conducción; en base a ellos, se construyó el módulo experimental los mismos que nos permitieron realizar las mediciones de la energía térmica.

Su aplicación práctica tendrá un alcance nacional, es decir, como beneficiarios tendremos a diferentes empresas, Academias y organizaciones que tengan interés de utilizar energía térmica en diversas aplicaciones, como: generación de electricidad, vapor de agua, cocción de alimentos, entre otros; que están relacionados con la actividad industrial del país

## 1.5 Objetivos

### Objetivo General

Configurar un sistema colector solar de incidencia indirecta con fines de generar energía térmica de alta temperatura en condiciones climatológicas de Huancayo Perú

### Objetivos específicos

- Determinar los parámetros medio ambientales del lugar, como; radiación solar, temperatura, presión atmosférica y la densidad, con la finalidad de dimensionar el sistema colector solar de incidencia indirecta.
- Dimensionar los componentes del sistema colector solar de incidencia indirecta, con fines de realizar el experimento
- Evaluar la disposición de los componentes del sistema solar de incidencia indirecta, variando los factores en dos niveles, con fines de determinar los efectos en la generación de energía térmica de alta temperatura

## CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

### 2.1 Antecedentes de investigación

Después de haber revisado diversas fuentes de información, particularmente investigaciones, se cita como antecedentes los siguientes:

Avellaner (1999), en su tesis doctoral “Análisis estadístico de superficies reflectantes, no ideales, a efectos de conocer la distribución espacial de la energía solar reflejada”, plantea un procedimiento basado en el análisis de las calidades superficiales y precisiones de seguimiento, para ello utilizó instrumentos que se adaptan bien a las plantas comerciales que por su naturaleza utilizan colectores de grandes dimensiones, basados en sistemas mecánico-óptico(Avellaner, 1999); los mismos que presentaron problemas de aplicabilidad en la caracterización de la energía y su distribución en el receptor y para superar estos problemas inserta un instrumento de nivel electrónico de precisión. En nuestro caso, se utilizó la metodología del diseño factorial  $2^K$ , para lo cual se empleó un módulo de incidencia indirecta que engloba a Helióstato, atenuador, concentrador parabólico y un receptor; con los cuales demostrar la elevación de temperatura ambiental por encima de los 200 °C.

Pérez (2015), en su tesis doctoral “Caracterización óptica y térmica del Horno Solar del IER, determina el error óptico global, el pico máximo de concentración solar y la potencia del Horno Solar, a través de la caracterización óptica y térmica, aplicando metodologías novedosas y utilizando dispositivos”. En la caracterización óptica del horno, se determinaron de manera teórica “las distribuciones de flujo radiativo concentrado en la zona focal y se obtuvieron las distribuciones reales por medio de dispositivos que permitieron realizar mediciones de manera directa e indirecta de la radiación solar altamente concentrada en la zona focal” (Pérez, 2015, p.108). Para la caracterización térmica, “se diseñó y construyó un calorímetro de cavidad para la medición directa de la potencia del horno y se realizaron pruebas de fundición de diversos materiales para conocer la temperatura que es capaz de alcanzar” (Pérez,

2015, p. 108). En nuestro caso, primero se evaluó la radiación directa, difusa y general en el lugar, con asistencia de una estación actinométrica, a partir de ello, se diseñó el sistema óptico utilizando los principios de transferencia de calor y la óptica, que nos permita visualizar la variación de la temperatura.

Villeda (2010), en su tesis doctoral Horno solar de alta temperatura para el cocimiento de Tabiques de arcilla, “describe el diseño y caracterización de los componentes de un horno solar para el cocimiento de tabiques de arcilla de 0,07 x 0,14 x 0,28 m dentro de una cámara con una capacidad para 40 piezas”. Es así, “para dirigir la luz del sol hacia la cámara de cocimiento, se emplea un helióstato con 9 espejos de 1 x 1 m los mismos que emiten los rayos del sol a un concentrador parabólico fuera de eje, luego enfoca la luz a la entrada de la cavidad de cuerpo negro” (Villeda, 2010, p. 12). En este sistema, “el Helióstato tiene un seguidor solar que realiza los ajustes primario y secundario para garantizar que la radiación solar siempre llegue al concentrador parabólico” (Villeda, 2010, p.12) y “la cámara de cocción tiene un cuerpo negro que absorbe la radiación solar para generar el calor que es necesario en la cocción de los tabiques en el interior de la cámara” (Villeda, 2010, p.12). En nuestro caso, se hizo variar posiciones acimutales y de elevación en el helióstato, la apertura del atenuador en dos ubicaciones y la disposición del concentrador también en dos posiciones; y con ellos buscar la mejor alternativa de generación de energía de alta temperatura.

Fernández (2011), en su tesis doctoral “Sistemas ópticos para Concentración, captación y guiado de radiación solar, presenta un nuevo concentrador asimétrico para fuente finita, hiperboloide de una hoja, obtenido mediante la teoría del campo de luz”, con ello, demuestra la concentración asimétrico ideal en 3D, y que su “forma no interfiere en las líneas de flujo de un disco elíptico que sería el receptor, su diseño se basa en la aplicación de la teoría de campo de luz para un emisor Lambertiano con forma de cono truncado” (Fernández, 2011, p. 16). Geométricamente, el perfil del HPC está “compuesto por la unión de una hipérbola y de una parábola girada con sus focos situados en el vértice del cono; además se

ha desarrollado un método de optimización inteligente automático para ópticas complejas controlado por Matlab” (Fernández, 2011, p.22). En nuestro caso, el diseño del concentrador parabólico se realizó en base a la metodología VDI 2222 y 2221, los cálculos numéricos, y las herramientas del Autocad y Solidwork, a partir de ello, construir el concentrador y poner en funcionamiento.

Al-Nimr y Dahdolan (2015), en su artículo “Modelamiento de un nuevo concentrador solar mejorado con un poroso evaporador y un condensador interno”, plantea un nuevo diseño de alambiques solares que utiliza concentración, evaporación porosa, condensación interna y termosifón circular, en ello, simula un modelo matemático de estado estable, mostrando la eficiencia, como la velocidad del destilado. El aumento de la temperatura ambiente y la intensidad solar incrementa la eficiencia y las tasas de destilación (Al-Nimr y Dahdolan, 2015). En caso nuestro, se modeló la generación de energía térmica de alta temperatura en función a la disposición de los componentes del sistema de incidencia indirecta.

Rohou, Mojiri, Rosengarten y Andrews (2015), en su artículo científico, “Diseño óptico de un sistema solar de concentración de Fresnel para la transmisión directa de radiación a través de un paquete de fibra óptica” sostiene que un sistema termosolar de alta temperatura es transferir eficientemente la energía solar concentrada a la carga, el uso de un concentrador solar junto con fibras ópticas agrupadas, tiene ventajas en términos de eficiencia de transmisión en comparación con un sistema de transferencia de calor convencional que emplea intercambiadores de calor y un fluido de transferencia de calor. En la investigación nuestra, la intención es también mostrar la transferencia eficiente de radiación solar a un punto focal, pero utilizando materiales reflectantes, esto nos permitió generar alta temperatura.

Abbas, Montes, Rovira y Martínez (2015), en su artículo científico “Colector cilindro-parabólico o colectores Fresnel lineal una comparación de características ópticas, incluida la calidad térmica basada en soluciones comerciales”, sostiene que los colectores cilindro parabólicos

(PTC) son todavía hoy la tecnología más madura en la concentración de energía solar, sin embargo, los colectores Fresnel lineales (LFC) han sido identificados por muchos autores como candidatos para reducir el costo nivelado de la electricidad, aunque con menor eficiencias. En consecuencia el resultado establece que la eficiencia máxima se obtiene mediante PTC, mientras que la más baja corresponde a LFC con receptor multi tubo (Abbas, Montes, Rovira y Martínez. 2015). En caso nuestro no se ha realizado comparaciones de dos sistemas, sino comparar las diversas combinaciones de la disposición de los componentes del sistema (panel, atenuador y el concentrador).

Durán, Enciso, Barbosa, Jiménez y Sánchez (2011), en su artículo “Diseño de disco colector solar de pequeña modularidad, presentan el análisis teórico del comportamiento térmico de un colector solar de disco parabólico reflector (PDR)”, para ello, inicia con el estudio de la radiación directa absorbida por el receptor y la aplicación de las ecuaciones de transferencia de calor; asimismo, en el diseño de la forma parabólica propone el uso de ecuaciones y los errores ópticos (Durán, et al. 2011). En caso nuestro, el diseño de la forma parabólico se hizo también, utilizando ecuaciones matemáticas, adicional a esto se utilizó software como el AutoCAD o Solidworks, es más, se evaluó la radiación directa, difusa y global del lugar, utilizando instrumentos de la estación actinométrica y meteorológica.

Echavarría (2011), en su tesis “Diseño de un colector cilindro parabólico compuesto con aplicación para el calentamiento de agua”, plantea la forma óptima del diseño de la geometría del colector y su análisis térmico, elección de materiales y la caracterización de la radiación solar, finalmente demuestra su viabilidad. El estudio que se ha realizado incluye el diseño geométrico no solo del concentrador, sino también del Helióstato, atenuador y el receptor, asimismo; se hizo la caracterización de la radiación teniendo en cuenta la directa, global y difusa.

Almsater, Saman y Bruno (2015), en su artículo científico “Mejora del rendimiento de los sistemas de almacenamiento térmico de calor latente

de alta temperatura utilizando tubos de calor con y sin aletas para plantas termosolares de concentración”, investiga un enfoque para reducir la resistencia térmica mediante la utilización de tubos de calor fijados axialmente, asimismo desarrolla un modelo numérico que simula los procesos de fusión y solidificación del material de cambio de fase, en consecuencia incluye los modelos de evaporación y condensación del fluido de trabajo de la tubería de calor. Con este enfoque muestran que al agregar cuatro finos axiales e incluir la evaporación y la condensación, el rendimiento térmico general del sistema de almacenamiento se mejora de forma significativa en comparación con las tuberías de calor desnudas (Almsater, Saman y Bruno. 2015). Los autores más están centrados en el receptor de calor y el tiempo de almacenamiento. El estudio que se ha realizado contiene el dimensionamiento del receptor en el foco del concentrador parabólico, y nos enfocamos en el almacenamiento de energía térmica, en el que medimos la temperatura en forma directa.

Escalante (2015), en su tesis “Desarrollo de un prototipo de tostador de granos de cacao de 6 kg/hora que funcione con energía solar concentrada” propone un tostador que usa la potencia térmica otorgada por un concentrados Scheffler de  $8\text{m}^2$  de superficie llegando a aprovechar 3.8 kW de potencia, haciendo posible tostar 3 kg de granos de cacao en media hora, es decir, 6 kg por hora en dos etapas. Luego realiza un análisis térmico del tostador, evaluando las temperaturas, potencia entregada por el sol y la potencia recibida, con la finalidad de obtener expresiones que permitan simular el comportamiento del tostador antes de construir un primer prototipo (Escalante, 2015). En la investigación a desarrollarse el concentrador que se ha diseñado es de disco-parabólico, que recibe la radiación reflejada del Helióstato, y no directamente del sol como plantea la tesis mencionada, es más, intervino otros componentes adicionales como el atenuador y el receptor, la particularidad en sí, radica en la configuración de las posiciones utilizando diseños factoriales  $2^K$

## 2.2. Bases teóricas

### 2.2.1 Colector solar de Incidencia Indirecta

Es un sistema cuya función principal es captar la radiación solar a través de un panel plano denominado heliostato o de Fresnel que refleja la luz o los fotones hacia un concentrador parabólico y ésta a su vez emite los rayos hacia un receptor que se halla en el punto focal. Este sistema es denominado también como Horno solar, por lo que se amplía la teoría en base a este último (Tolmasquim, 2016).

#### 2.2.1.1 Horno solar

Según Almada, Cáceres, Singer y Pulfer (2005), el horno solar es un artefacto que permite cocinar alimentos utilizando la energía del sol, a veces llamado cocina solar de caja, pertenece al grupo de las cocinas solares de acumulación, básicamente es un espacio térmicamente aislado, diseñado para capturar la mayor cantidad posible de luz solar, transformarla en calor útil y conservarlo en su interior para preparar alimentos. Rodríguez (2011), define al horno solar como un “sistema óptico que concentra la radiación solar en un área reducida donde se puede alcanzar muy altas temperaturas y flujos de radiación solar muy elevados”.

### Clasificación de los hornos solares

Según Rodríguez (2011), los hornos solares se clasifican en:

**Hornos de incidencia directa**, en los que el concentrador hace el seguimiento solar y pueden ser de lente simple (Figura 1. a), lente múltiple y de reflector parabólico (Figura 1 b), los concentradores parabólicos pueden ser de gran tamaño (faceteados), hechos de metal estirado, plástico o fibra de vidrio (Rodríguez, 2011). En este tipo de hornos se obtienen los flujos de radiación más altos, pero deben seguir el movimiento aparente del Sol tanto el concentrador como la muestra, componiendo un sistema poco práctico y difícil de usar (Rodríguez, 2011).

En hornos de incidencia directa, la palabra recolector se aplicará al sistema total, incluidos el receptor y el concentrador, el receptor es donde la radiación es absorbida y convertida en alguna otra forma de energía,

incluye el absorbedor, sus cubiertas asociadas y el aislamiento; mientras que el concentrador, es la parte del colector que dirige la radiación hacia el receptor (Duffie & Beckman, 2013).

**Hornos de incidencia indirecta o tipo heliostato**, están formados por uno o varios heliostatos que hacen el seguimiento solar y reflejan los rayos solares en un concentrador parabólico que los une en un foco estático y accesible, esta configuración es la que se conoce propiamente como horno solar, pero presentan algunas desventajas respecto a los hornos de incidencia directa: son más caros, presentan mayores pérdidas de radiación por las reflexiones múltiples y requieren un mantenimiento mayor (Roldán, 2013). Los hornos de tipo heliostato se pueden clasificar, a su vez, en hornos de eje óptico horizontal (Figura 01 c) y de eje óptico vertical (Figura 1.d). Este diseño varía en función de la aplicación que se va a llevar a cabo, siendo los de eje horizontal los más extendidos para mayores tamaños; los de eje vertical cuentan con la ventaja de que pueden realizar experimentos de fusión superficial de muestras sin que sufran pérdidas de material (Roldán, 2013).

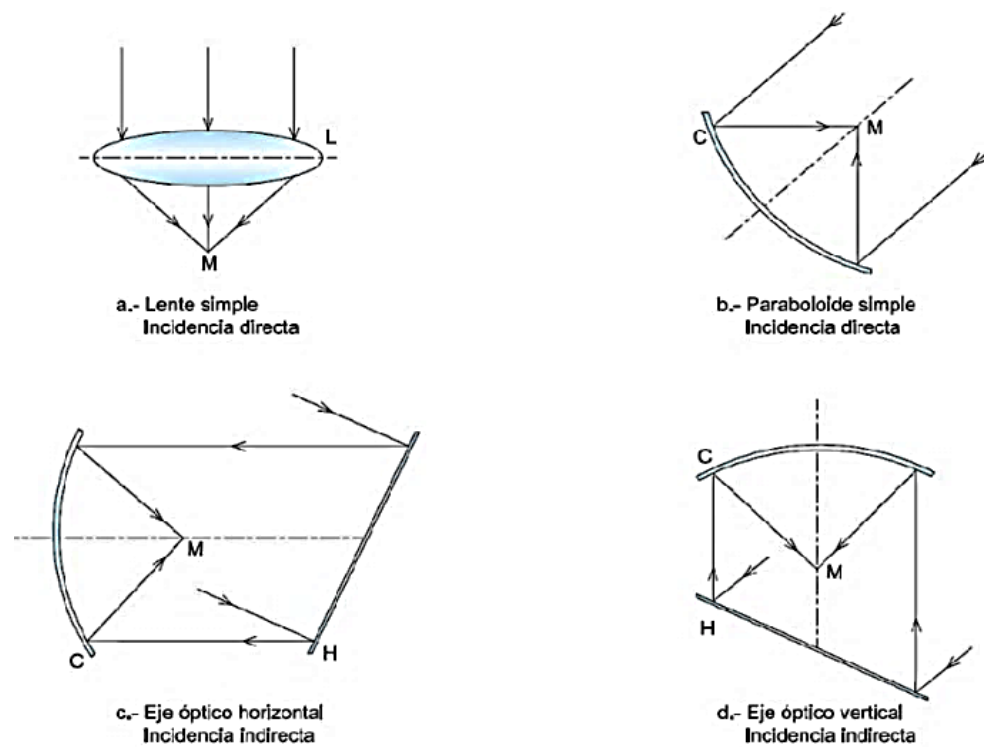


Figura 2.1: Diagrama de los diferentes tipos de hornos (Fuente; Roldán, 2013)

En general los hornos solares siempre están constituidos por un sistema óptico, es decir por uno o más helióstatos (espejos planos) con seguimiento automático continuo del sol que reflejan la radiación solar a un espejo concentrador, el cual puede ser un espejo paraboloide o un grupo de espejos esféricos (Roldán, 2013). El nivel de potencia del horno es ajustado usando un atenuador, regulando la cantidad de radiación que llega al concentrador, y está localizado ente el helióstato y el concentrador (Roldán, 2013).

La zona de ensayos está situada en el foco concentrador y, debido a que la zona focal del espejo concentrador está fija, es sencillo instalar aparatos experimentales o de aplicación, tales como una mesa de ensayos que se utiliza para posicionar en el foco los materiales a ensayar con la máxima precisión (Fig. 2.2) (Roldán, 2013).

### 2.2.1.2 Dimensiones del sistema de incidencia indirecta

Para Roldán (2013), las dimensiones del sistema de incidencia indirecta están constituidos por Helióstato, Atenuador, Concentrador y la Zona focal, tal como se aprecia en la figura 2.2

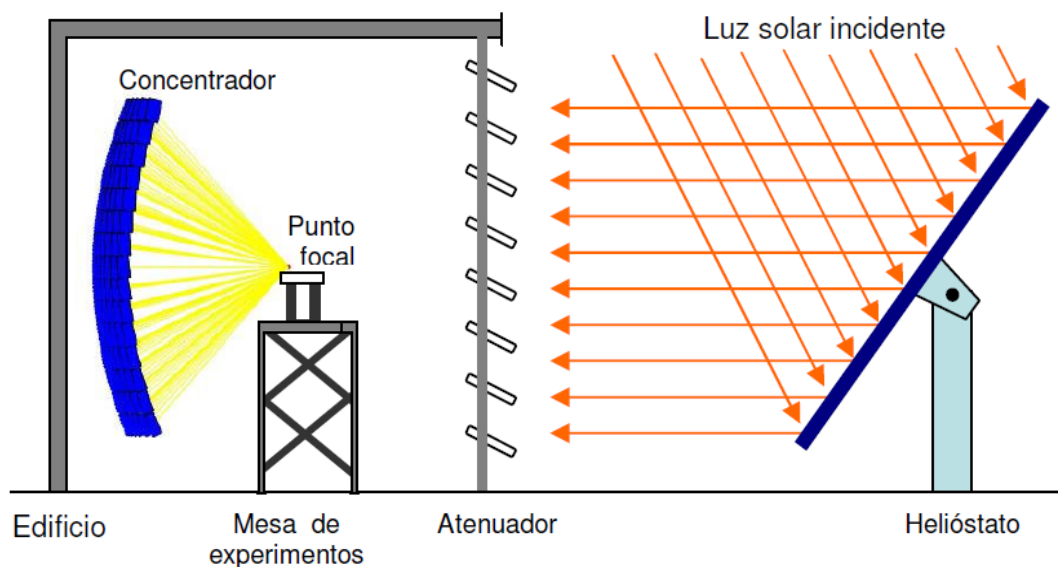


Figura 2.2: Componentes de un horno solar

Fuente; Roldán, 2013

De manera sucinta se establece las funciones de cada componente, tal es así; Un helióstato es una superficie reflejante, con seguidor solar, que refleja la

radiación solar sobre una región focal, concentrando hasta 600 veces la luz solar y operando a temperaturas entre los 250°C y 1000°C. (Roldán 2013).

El atenuador es un mecanismo que permite ajustar la radiación reflejada con la finalidad de ajustar la potencia del horno y está localizado entre el heliostato y el concentrador. (Riveros, 2008, p. 17)

El concentrador es una superficie reflejante que concentra la radiación solar en el punto focal fijo. (Roldán 2013)

La Zona Focal es lugar donde se concentra la radiación solar produciendo altas temperaturas, además es donde se ubica los objetos a experimentar durante la investigación (Roldán 2013).

### Heliostato

Es un dispositivo que capta la radiación solar y proyectarla hacia un receptor, es decir, hacia un concentrador solar. Para que esto ocurra, “es necesario que el vector normal al plano del espejo bisecte el ángulo formado entre el vector de incidencia solar y el vector proyección, este último vector va del centro de plano del espejo al punto deseado de incidencia” (Marroquín García, 2011). Ver Figura 2.3

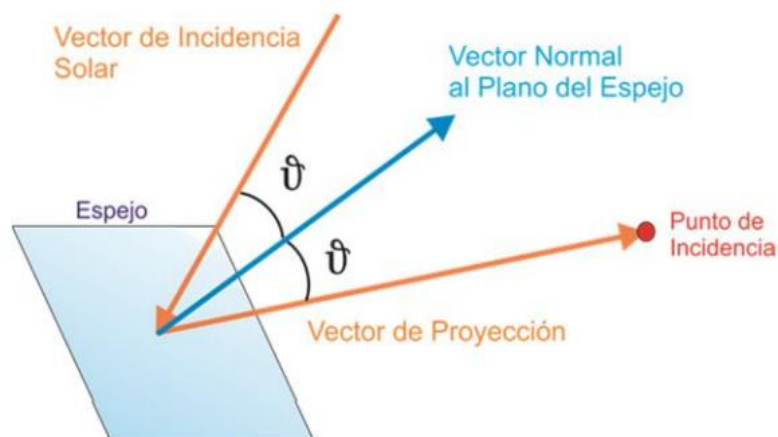


Figura 2.3: Funcionamiento del Heliostato (Marroquín García, 2011)

En la tesis se implementa el modo de Horno Solar, donde “el vector de proyección mantiene el ángulo de incidencia constante sobre el concentrador; si los rayos inciden en un ángulo diferente, la imagen del sol se formará en un punto del plano focal desplazado respecto al foco nominal” (Marroquín García, 2011). (Figura 2.4)

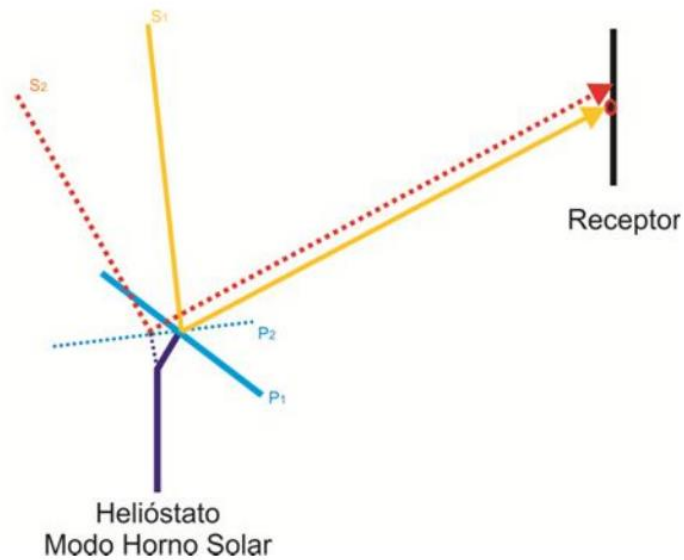


Figura 2.4: Vector de proyección de un horno solar (Marroquín García, 2011)

### Concentrador solar

Los concentradores tienen un principio fundamental de funcionamiento: “Para cualquier rayo que incida en la parte interior de una parábola en forma paralela a su eje (de la parábola), su reflexión especular pasará siempre por el foco de dicha parábola, sin importar en que parte incida” (Bauerle Concha, 2018), tal como se muestra en la figura 2.5.

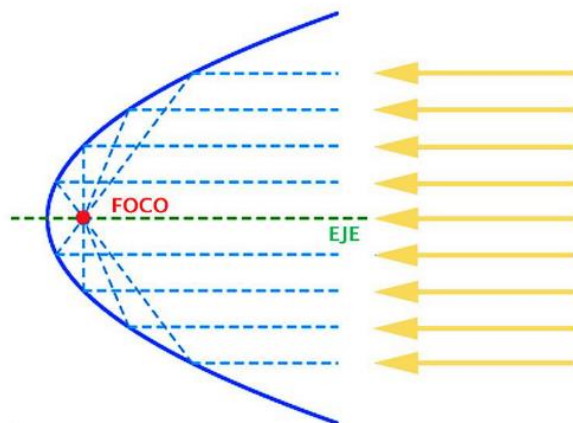


Figura 2.5: Principio de funcionamiento de concentradores (Bauerle Concha, 2018)

Generalmente en el contexto global, se vienen utilizando concentradores como; cilindros parabólicos y los paraboloides de revolución (o disco parabólico), tal es así, los de concentración lineal (cilindro-parabólicos) puede llegar “a un

factor de concentración de 100, mientras que, los concentradores parabólicos de revolución suelen concentrar el flujo de radiación en el orden de 10 000 veces la densidad energética incidente de una superficie expuesta al sol” (Bauerle Concha, 2018).

### **2.2.1.3 Principios de funcionamiento del Horno Solar**

Según Franco, Saravia, Cadena, y Fernández (2003, p.25), “Utilizando las propiedades térmicas del aluminio se encuentra que se necesita una potencia sobre el crisol de 1100 W, la temperatura a la que debe llegar es como mínimo 660 °C, que es la temperatura de fusión del aluminio puro, aunque debido a que las latas de aluminio son de una aleación, el punto de fusión está a una temperatura ligeramente menor”.

El concentrador parabólico funciona como un espejo parabólico fuera de eje, está diseñado para reflejar la luz hacia un objetivo situado a cierta distancia del reflector de manera que no proyecte sombra en el espejo (Gutiérrez, 2005, p. 8). El reflector Scheffler es una sección lateral de un paraboloides más grande cortado de manera inclinada, que le da la forma elíptica característica y única del reflector, donde la luz solar que es reflejada lo hace sobre una sección del paraboloides y se proyecta sobre un punto situado a cierta distancia del reflector (foco del paraboloides) (Gutiérrez, 2005, p. 8).

Los motivos que llevan a utilizar un horno solar para investigación, según Bliss (1957), citado por Riveros Rosas (2008, p. 16), es que un horno solar provee una atmósfera de trabajo limpio sin contaminantes químicos ni eléctricos, además la intensidad de la radiación de calor puede controlarse con precisión y rapidez.

Entonces, el horno solar utiliza un reflector Scheffler que permite reflejar la radiación a un punto focal situado a cierta distancia del mismo, constituyendo el helióstato un ente reflector hacia el concentrador, para que la radiación sea concentrada por una parabólica en la zona focal

produciendo el calentamiento en una atmosfera sin contaminantes químicos ni eléctricos (Riveros Rosas, 2008).

### 2.2.2 Conversión térmica de la radiación solar concentrada

Para realizar la conversión térmica, la concentración de la radiación solar tiene que ser significativo, a fin de obtener mayores potencias por unidad de superficie o volumen, mayores temperaturas y mayor capacidad de trabajo (Téllez, 2011), según el segundo principio de la Termodinámica, “un sistema sólo realizará trabajo cuando se pasa de un estado de equilibrio a otro y, si éste es cerrado, su energía y cantidad de materia se mantienen constantes, maximizándose la entropía en la transición entre estados de equilibrio” (Téllez, 2011). El mismo autor establece que el aumento de la entropía es exponencial y cada vez se requerirá una mayor energía para conseguir la misma cantidad de trabajo. Sí, se asocia este concepto a máquinas térmicas, se ve que el calor no puede ser transformado plenamente en trabajo; por lo que, “el rendimiento de una máquina térmica asociada a un sistema energético (el termosolar), es mayor cuanto más alta sea la temperatura de operación, estando relacionada ésta, a su vez, con la temperatura del receptor o absorbedor de la energía” (Téllez, 2011).

Según Tellez (2011), “los sistemas termo solares de concentración están formados por dispositivos que re direccionan la radiación solar incidente sobre una superficie de captación ( $A_C$ ) y la concentran sobre otra absorbidora de menor tamaño ( $A_{Abs}$ ) el cociente entre sus dos áreas define la razón de concentración geométrica ( $C_g$ )”

$$C_g = A_C / A_{Abs} \quad \text{Ecuación 01}$$

Si representamos esta ecuación en función de los flujos energéticos de incidencia ( $F_I$ ) y concentrado ( $F_C$ ), se obtiene la razón de concentración en flujo de energía ( $C_f$ ):

$$C_f = F_C / F_I \quad \text{Ecuación 02}$$

Teóricamente, “ambas ecuaciones serían equivalentes pero, experimentalmente, siempre se da que la razón de concentración geométrica es mayor que la de concentración en flujo energético” (Téllez, 2011).

Según Téllez y Denk (2011), “el balance energético para el absorbedor puede expresarse mediante la siguiente expresión”:

$$\frac{\dot{Q}_{gain}}{A} = \alpha \cdot C \cdot G_b - \sigma \cdot \varepsilon \cdot (T_{abs}^4 - T_{amb}^4) \quad \text{Ecuación 03}$$

Donde:

$Q_{gan}$  = Potencia ganada a la salida del receptor (W).

A = Área de apertura del receptor o absorbedor (m<sup>2</sup>)

$\alpha$ , = Absortividad hemisférica del material absorbedor.

C = Factor de concentración solar (soles  $\approx$  W/m<sup>2</sup>).

$\sigma$  = Constante de Stefan-Boltzmann (5.67·10<sup>-08</sup> W/m<sup>2</sup> - K<sup>4</sup>).

$\varepsilon$ = Emisividad hemisférica del material absorbedor.

$G_b$  = Irradiancia solar directa normal (W/m<sup>2</sup>).

$T_{abs}$  = Temperatura homogénea del absorbedor (K).

$T_{amb}$ = Temperatura efectiva de la atmósfera que rodea al absorbedor (K).

En consecuencia, “la eficiencia de absorción del absorbedor ( $\eta_{rec}$ ) es el cociente entre la potencia ganada y la irradiancia solar concentrada que incide sobre el receptor o absorbedor” (Téllez, 2011):

$$\eta_{rec} = \frac{\dot{Q}_{gain}/A}{C \cdot G_b} \quad \text{Ecuación 04}$$

Téllez y Denk, (2011), sostiene “que la temperatura de estancamiento se define mediante la siguiente expresión”:

$$T_{abs\_max} = \left( \frac{\alpha \cdot C \cdot G_b}{\varepsilon \cdot \sigma} + T_{amb}^4 \right)^{\frac{1}{4}} \quad \text{Ecuación 05}$$

La eficiencia para los ciclos reales, llamada eficiencia técnica ( $\eta_{tec}$ ), según Téllez y Denk, (2011) es:

$$\eta_{tec} = \frac{\bar{T} - T_{amb}}{\bar{T}} \quad \text{Ecuación 06}$$

Donde  $\bar{T}$  es una temperatura técnica definida, para una temperatura inicial ( $T_1$ ) y final ( $T_2$ ) del fluido portador de calor que circula por el ciclo técnico, y está dada por;

$$\bar{T} = \frac{T_2 - T_1}{\ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)} \quad \text{Ecuación 07}$$

Tellez y Denk (2011), establece que la “máxima eficiencia alcanzable en la conversión de la radiación solar concentrada en trabajo viene determinada por la eficiencia óptica del absorbedor y la eficiencia técnica” y es:

$$\eta_{tot\_rec} = \eta_{rec} \cdot \eta_{tec} \quad \text{Ecuación 08}$$

La temperatura alrededor del receptor es menor que la temperatura del absorbedor, y tiene en cuenta las variaciones térmicas en el receptor y las pérdidas de calor. Entonces, para cada valor de concentración solar, la temperatura óptima técnica será: las pérdidas de calor. Entonces, para cada valor de concentración solar, la temperatura óptima técnica será:

$$0 = \frac{d\eta_{tot\_rec}}{dT_{abs}} = \frac{d}{dT_{abs}} \left[ \frac{\dot{Q}_{gain}/A \cdot \bar{T} - T_{amb}}{C \cdot G_b \cdot \bar{T}} \right] \quad \text{Ecuación 09}$$

Sustituyendo la temperatura técnica con  $T_2=T_{abs}$  y desarrollando la derivada, se obtiene una función cuya solución da la temperatura óptima del receptor acoplado al ciclo técnico (real):

$$0 = \left[ -4 \cdot \sigma \cdot \varepsilon \cdot T_{abs}^3 \right] \left[ \frac{T_{abs} - T_1 - T_{amb} \cdot \ln\left(\frac{T_{abs}}{T_1}\right)}{T_{abs} - T_1} \right] + \left[ \alpha \cdot C \cdot I - \sigma \cdot \varepsilon \cdot (T_{abs}^4 - T_{amb}^4) \right] \left[ \frac{T_{amb} \left( \ln\left(\frac{T_{abs}}{T_1}\right) + \frac{T_1 - T_{abs}}{T_{abs}} \right)}{(T_{abs} - T_1)^2} \right]$$

$$\text{Ecuación 10}$$

### **2.2.3 Evaluación de la radiación solar**

La evaluación de la radiación consiste en hacer la medición utilizando instrumentos de precisión como los piranómetros, también incluye la evaluación utilizando software como RetScreen Plus, NASA, entre otros; sin embargo, sus bondades están orientados a países europeos, en el nuestro presenta errores considerables. Para la obtención de datos es necesario instalar estaciones actinométricas y meteorológicas dotadas de piranómetros y perheliómetros.

#### **2.2.3.1 Piranómetros**

Son instrumentos para medir la radiación total (directa más difusa), “tiene una respuesta independiente del ángulo de incidencia de la radiación solar, los detectores de la mayoría de los piranómetros están cubiertos con una o dos cubiertas de vidrio hemisféricas para protegerlos del viento y otros efectos extraños (Duffie & Beckman, 2013); “las cubiertas deben tener un espesor muy uniforme para no causar una distribución desigual de la radiación en los detectores y si está protegido de la radiación del haz por un anillo de sombra o un disco, un piranómetro mide la radiación difusa” (Duffie & Beckman, 2013). Ver figura 2.6 izquierdo.

#### **2.2.3.2 pirheliómetro**

Es un dispositivo que usa un detector para medir la radiación que emite el sol, sobre todo, mide la radiación de haz con incidencia normal; tal es así, el actinómetro de Kipp & Zonen se basa en el diseño de Linke-Feussner y utiliza una termopila de constantano-manganina de 40 uniones calentadas por radiación y uniones frías en buen contacto térmico con la carcasa, al exponerse a la radiación solar, las uniones calientes se elevan rápidamente a temperaturas por encima de la unión fría; la diferencia de temperaturas proporciona una medida de la radiación(Duffie & Beckman, 2013). Ver figura 2.6 derecha



Figura 2.6: Piranómetro para medir radiación directa-difusa y Pirheliómetro.

### 2.2.4 Metodología de diseño

Los métodos de diseño se han hecho principalmente para ordenar la actividad creadora del diseñador y uniformizar en cuanto a su lenguaje, definiciones, y su estructura, tal como establece la VDI 2221 (Verein Deutscher Ingenieure)

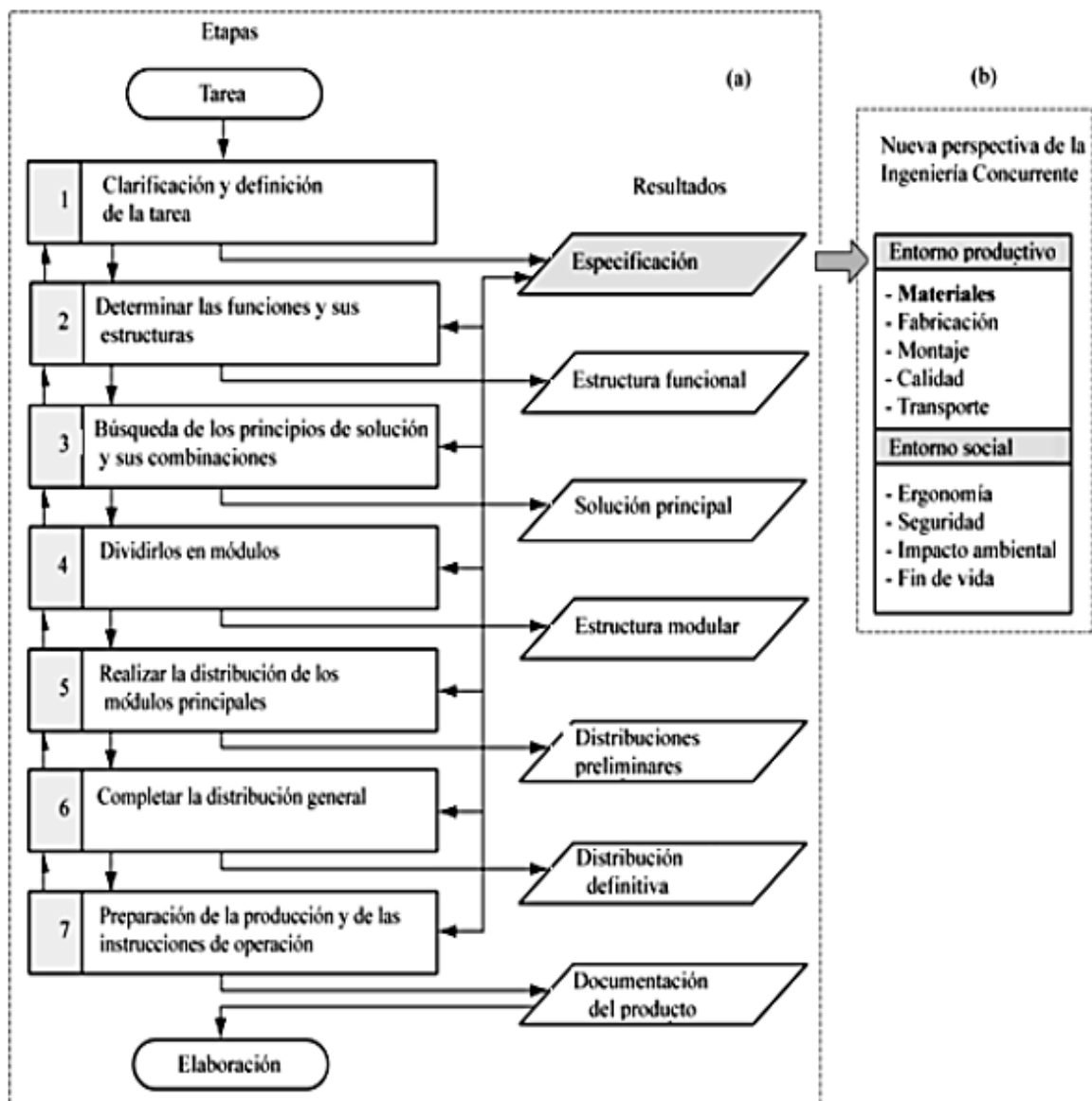


Figura 2.7; Proceso de diseño según VDI 2221. Fuente; Dumitrescu, Quesada, Pérez, Hernández, (2010).

Esta metodología es denominada “Enfoque sistemático para el diseño de sistemas técnicos y productos” (Dumitrescu, Quesada, Pérez, Hernández; 2010). Además este método optimiza el procedimiento y busca mejores soluciones aumentando así su rendimiento, tal como se observa en la figura 2.7.

Según Espinoza (2013), el “método de diseño en ingeniería mecánica, es el proceso de generación Morfológica de objetos nuevos que transforma las necesidades en soluciones documentadas para su construcción”. Para iniciar el proceso “es importante identificar una necesidad básica que requiera solución por medio del diseño, además debe identificarse las restricciones con que se enfrenta y los requerimientos particulares” (C. A. Espinoza, 2013). En la figuras 2.8, se muestra el proceso de diseño.

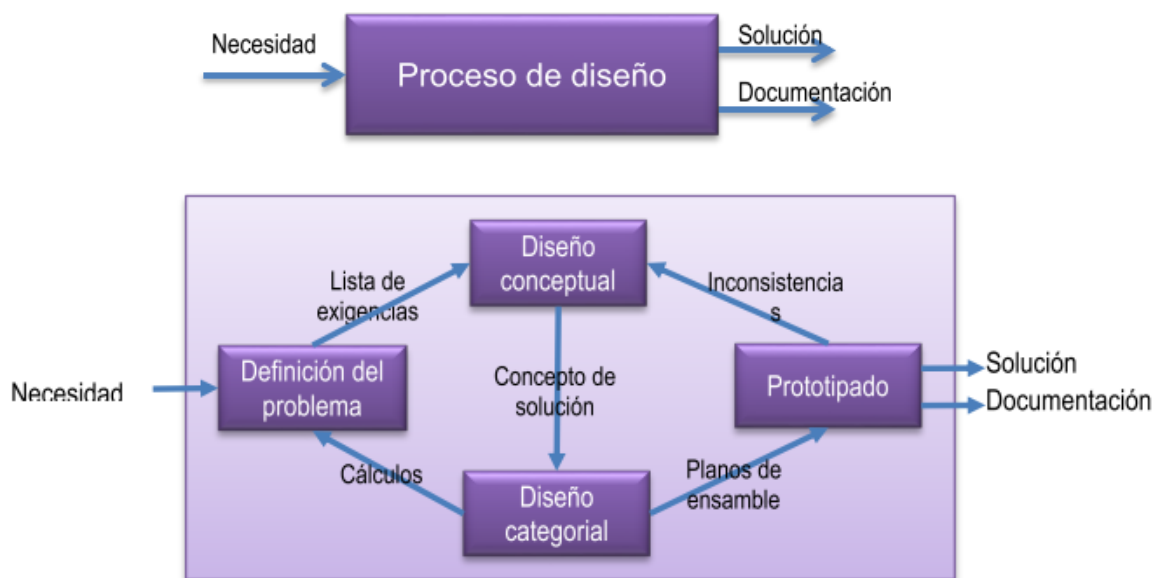


Figura 2.8; Proceso de diseño (Espinoza, 2013).

Como función, en el proceso de diseño, la definición del problema consiste en formular la lista de exigencias; el diseño conceptual define el concepto recomendable de la solución; el diseño categorial exige la elaboración de planos de fabricación y ensamble, y el prototipado consiste en elaborar el modelo y luego evaluarlos (Espinoza, 2013).

Además, la metodología 2221, contempla cuatro fases de diseño tales como: Fase I de información, Fase II de creación, Fase III de desarrollo y la Fase IV de

la elaboración (Ingeniería de detalle); La figura 2.9, muestra el método de diseño y sus fases (Barriga Gamarra, 2016).

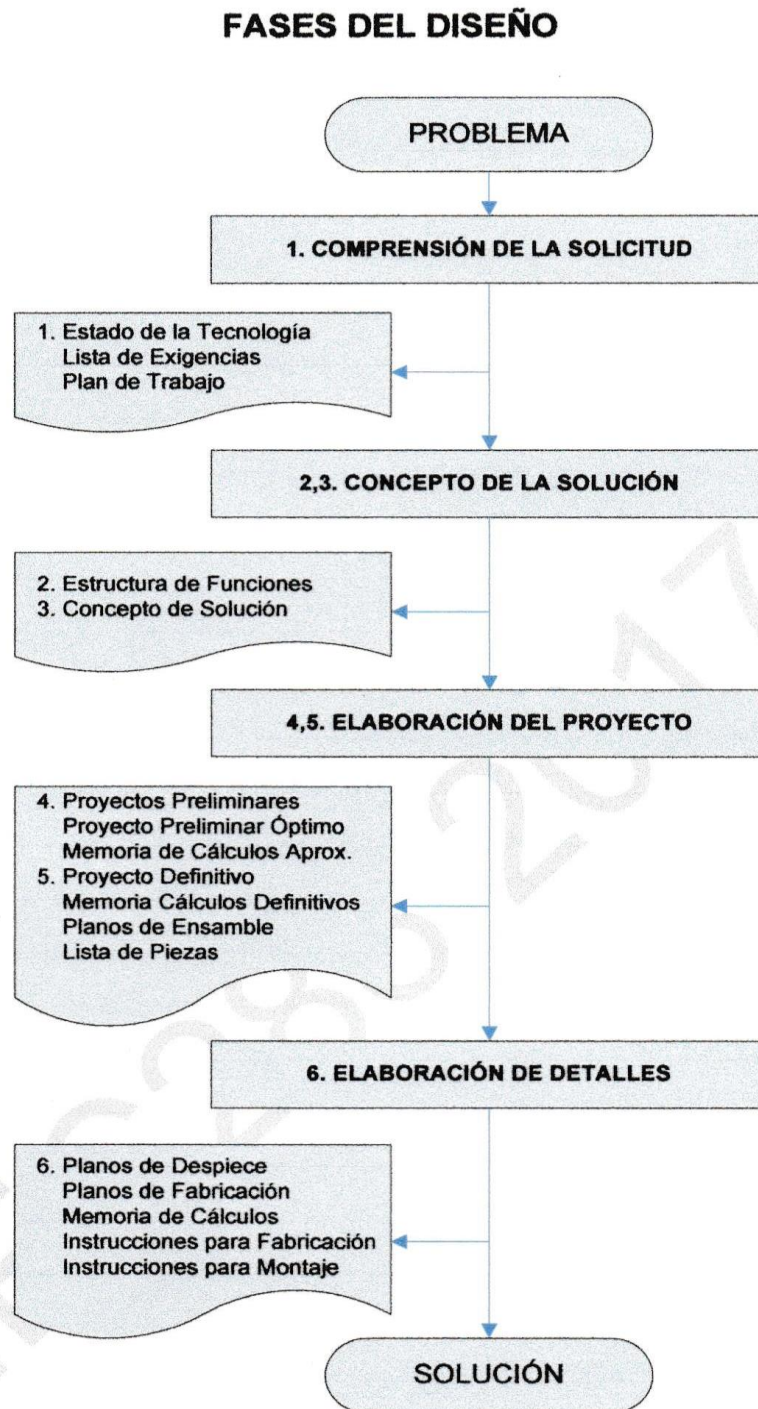
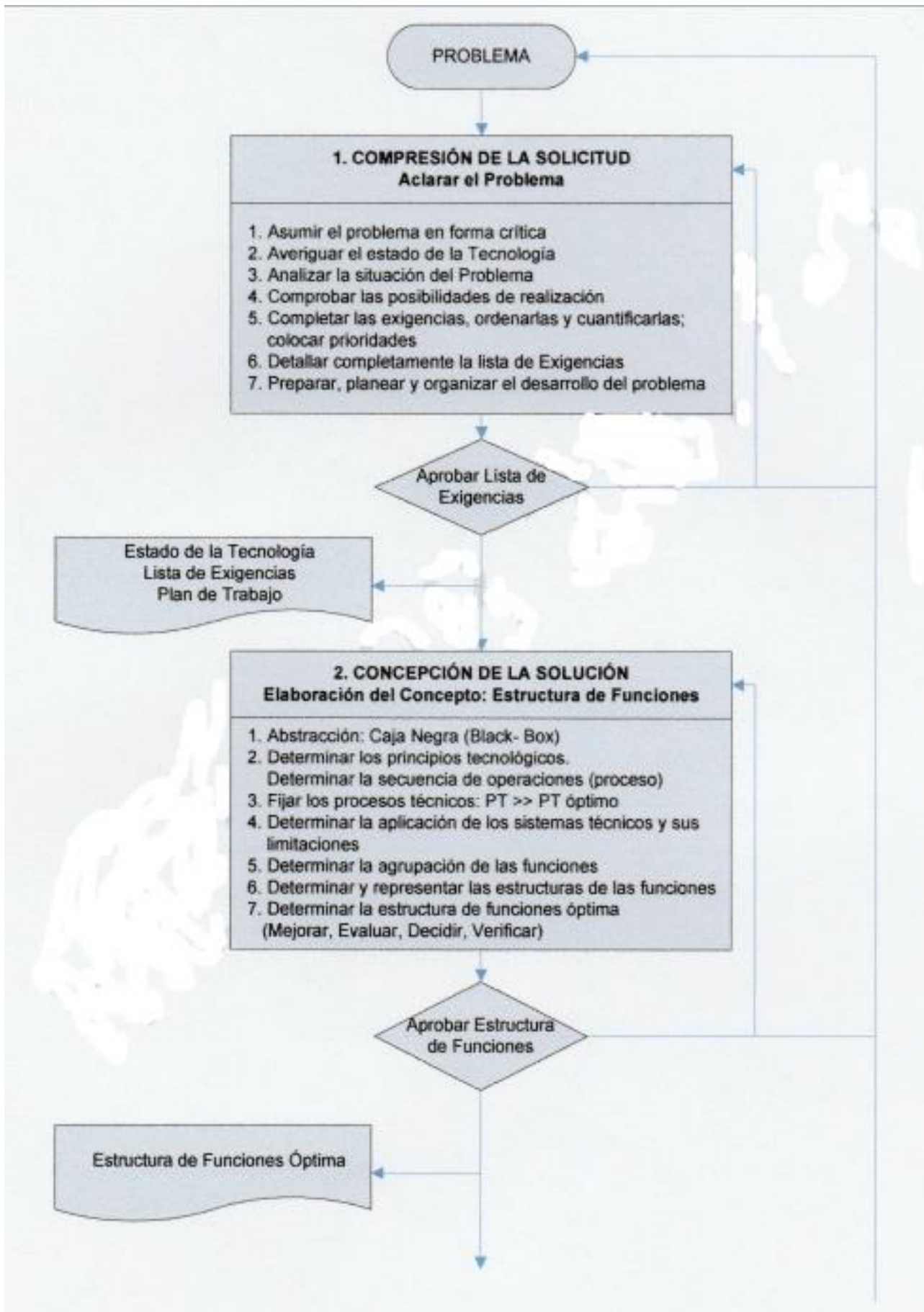
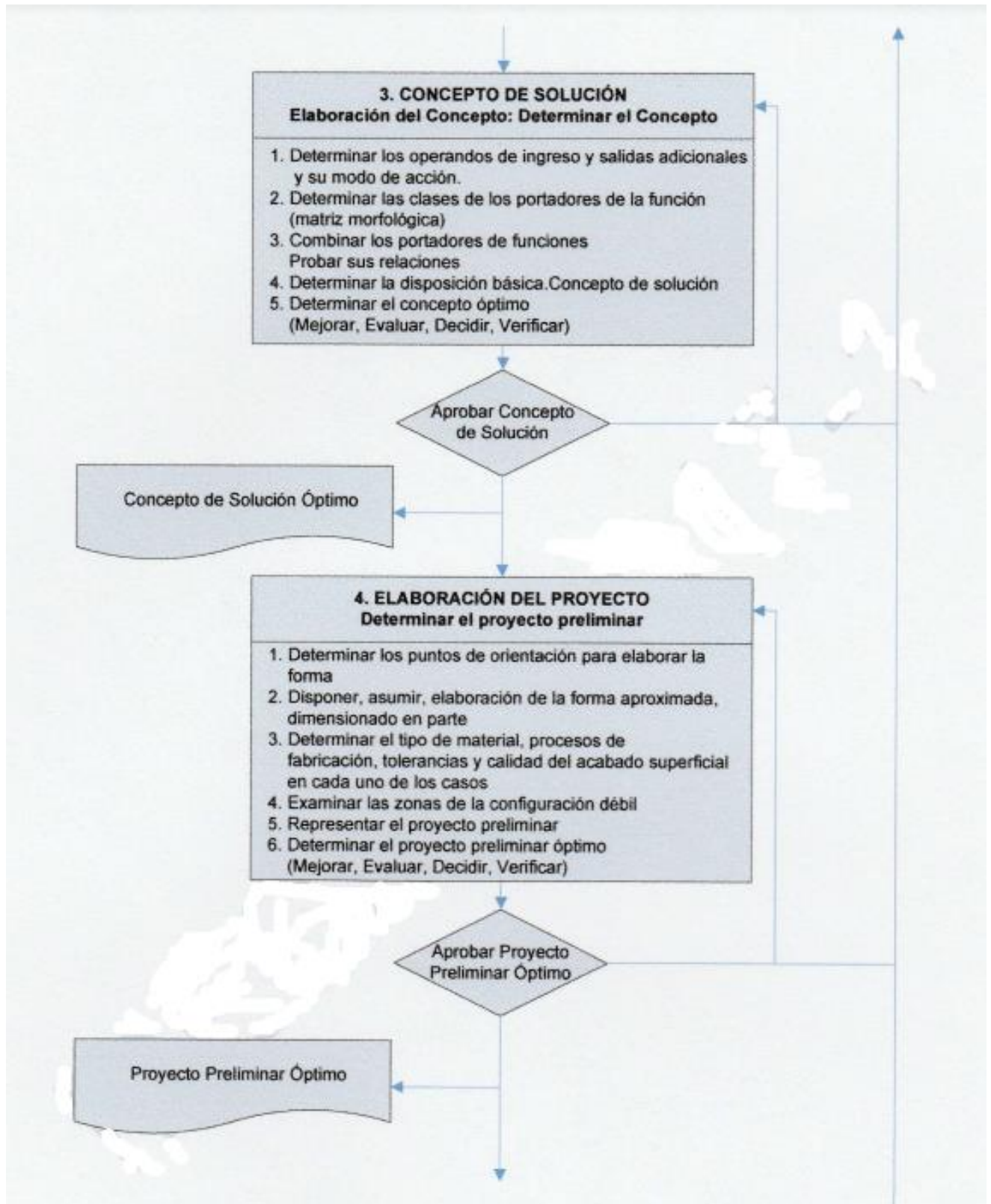


Figura 2.9; Método de diseño y sus fases (Barriga Gamarra, 2016).

El detalle del proceso de desarrollo de las actividades de cada fase, se muestra en la figura 2.10.





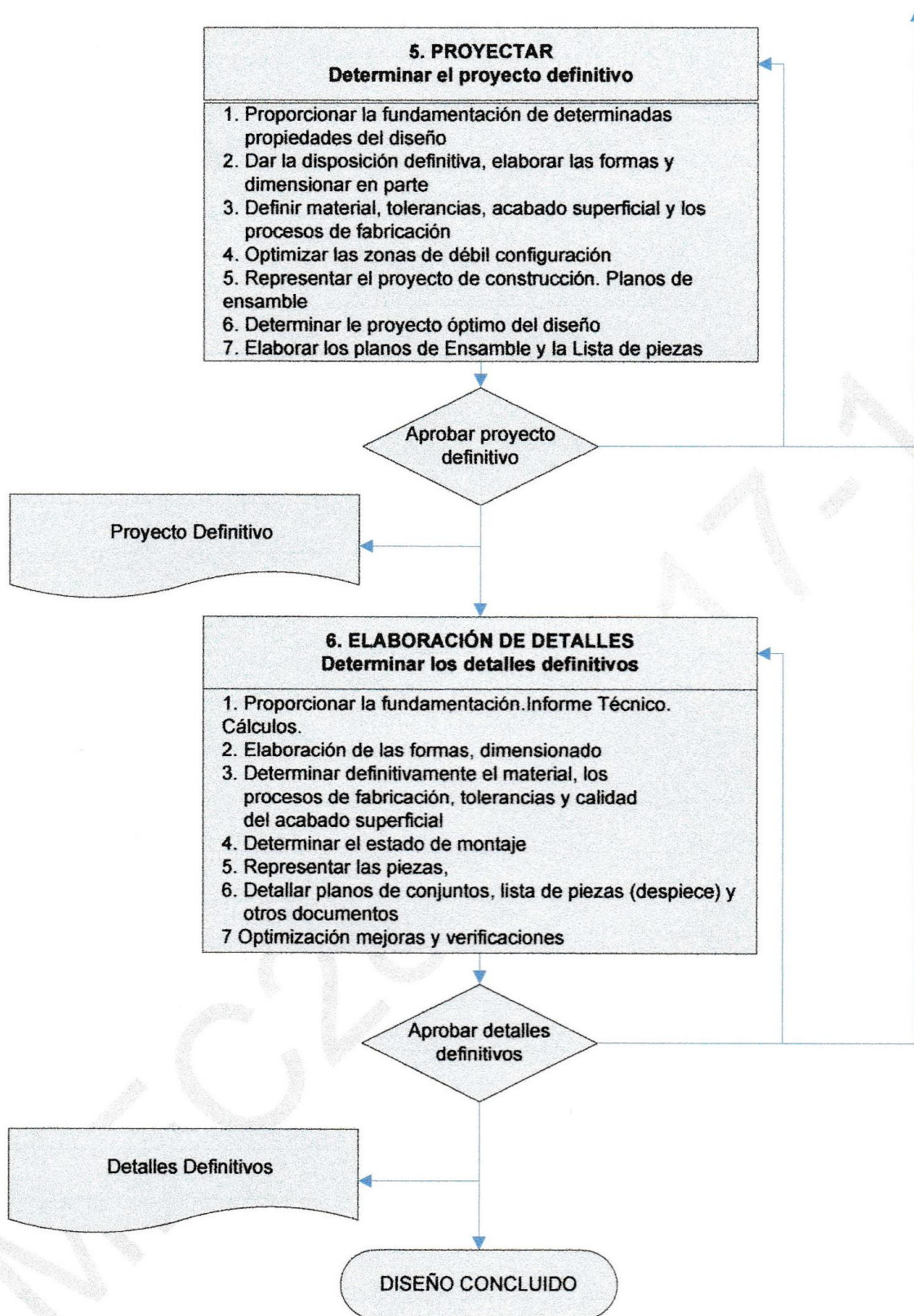


Figura 2.10; Método de diseño y sus actividades de cada fases (Barriga Gamarra, 2016)

## **2.2.5 Energía Térmica**

### **Energía.**

La energía en términos generales es la capacidad de realizar trabajo, y están asociados a los cuerpos cualquiera sea su causa, cuya “medida se realiza evaluando el trabajo que puede realizar o bien determinando el trabajo que ha sido necesario realizar para llevar al cuerpo o sistema a su estado actual, en consecuencia, la energía es una magnitud homogénea con el trabajo” (Gonzales, 2013).

La energía para un sistema cerrado que evoluciona entre dos estados de equilibrio, utilizando el primer principio de la termodinámica, es decir un trabajo adiabático, define el cambio de alguna propiedad del sistema y ésta se llama energía (Morán y Shapiro, 2005).

### **Energía térmica**

Es aquel que está asociada al movimiento de su estructura atómica o molecular del cuerpo (sólido, líquido o gaseoso), generando un incremento de temperatura a causa de la variación de la energía cinética de los átomos, iones o moléculas, de ahí, se asume que la energía térmica está vinculado con calor. Por tanto, “más caliente significa un movimiento al azar más rápido, tal es así, la medida del nivel térmico de un cuerpo es la temperatura” (Gonzales, 2013, p. 121).

Es así, que la “generación de energía se asocia con la conversión de otra forma de energía (química, eléctrica, electromagnética o nuclear) a energía térmica, y es un fenómeno volumétrico, es decir; ocurre dentro de un volumen de control y es proporcional a la magnitud de su volumen” (Incropera y De Witt, 1999, p. 87).

### **Energía que transporta la radiación electromagnética.**

Según Gonzales (2013), la energía que fluye en forma de ondas incluso en el vacío, “todos los cuerpos irradian este tipo de energía en forma de espectro de radiaciones de diferente longitud de onda y es una función de temperatura a la que se encuentre. La energía solar llega a la tierra en forma de radiación electro magnética, donde es absorbida parcialmente y convertida en diferentes formas de energía”.

La energía electromagnética se transmite incluso en el vacío, de un modo armónico y continuo a la velocidad de la luz y siguiendo dos campos perpendiculares entre sí en el espacio: campo eléctrico y campo magnético (Brenes y Saborío, 1995).

## **Temperatura**

Es una magnitud que nos ayuda identificar el nivel de energía térmica con que cuenta un cuerpo, “las partículas que poseen los cuerpos se mueven a una determinada velocidad, por lo que cada uno cuenta con una determinada energía cinética y está directamente relacionado con la temperatura del cuerpo” (Física Lab, 2018). Así, “a mayor energía cinética media de las partículas, mayor temperatura y a menor energía cinética media, menor temperatura, la temperatura es una magnitud escalar que mide la cantidad de energía térmica que tiene un cuerpo” (Física Lab, 2018).

Para Llorens y Barreras (2009), la temperatura no es fácil definir, es más fácil medir utilizando instrumentos denominado Termómetro; “se trata de medir una propiedad que varíe con la temperatura con un tipo de dependencia preferentemente lineal”.

Para Morán y Shapiro (2005), la temperatura es la propiedad intensiva junto a los medios para medirla, se origina con la percepción de nuestros sentidos y se basan en la noción de “calor” o “frio” que transmite un cuerpo.

## **Tipos de energía solar térmica**

A mi juicio, la energía térmica es única, que está basa en el calor y temperatura, sin embargo, podemos tipificar en; energía térmica de baja, media y alta temperatura. El primero está generalizado en el uso doméstico, es así, que el calor generado alcanza temperaturas por debajo de ebullición, a condiciones normales menores a 100 °C, en cambio, la energía de temperatura media también es usado en el sector doméstico y el de alta temperatura en sector industrial.

Sedigas (2013), establece que “los colectores de energía solar térmica son los encargados de captar la energía térmica de la radiación solar y estos se tipifican

como colectores de baja, media y alta temperatura, dependiendo de su forma de trabajo”.

**Colectores de baja temperatura.** So aquellos que “proveen calor útil a temperaturas menores de 65 °C. Una instalación solar térmica de baja temperatura está formada por captadores solares, dos circuitos de agua (primario y secundario), intercambiador de calor, acumulador, vaso de expansión y tuberías” (Sedigas, 2013).

**Colectores de temperatura media.** Son los dispositivos que “concentran la radiación solar para entregar calor útil a mayor temperatura, usualmente entre los 100 y 200 °C; entre ellos podemos citar a Captadores solares de vacío, Captadores solares de concentración” (Sedigas, 2013).

**Colectores de alta temperatura.** Son aquellos que “trabajan a temperaturas superiores a los 200°C, se usan para la generación de energía eléctrica. Las tecnologías utilizadas en energía solar térmica de alta temperatura son: Captadores cilindro-parabólicos, Centrales de torre, Discos parabólicos y Receptores lineales de Fresnel” (Sedigas, 2013).

### **Aplicaciones de la energía térmica.**

La energía térmica tiene diversas aplicaciones, sin embargo está enmarcado en el uso residencial, sanitario y recreativo, es más, de manera particular se puede emplear en; “climatización de espacios, producción de refrigeración y aire acondicionado; secado de diversos productos; destilación de agua salada, y también aplicaciones industriales y agropecuarias; a esto se suma la generación de energía eléctrica” (Sedigas, 2013).

Asimismo, Sedigas (2013), establece las formas de uso de la energía solar térmica, en la generación de energía eléctrica, a partir del vapor de agua producto de la radiación solar.

## CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

### 3.1 Tipo y diseño de investigación

El tipo de investigación desarrollado fue aplicada, debido a que los conocimientos de diseño en ingeniería, transferencia de calor y óptica fueron utilizados en la construcción del módulo del sistema de incidencia solar indirecta, con fines de, demostrar la generación de energía de alta temperatura en condiciones reales, el nivel que se alcanzó fue el experimental, donde se manipularon las variables independientes a fin de observar su efecto en la variable dependiente (Espinoza, 2014).

El diseño que se utilizó fue el Factorial  $2^k$ , debido a que se manipuló tres factores, cada uno en dos niveles.

Factores:

- Helióstato (H)
- Atenuador (A).
- Concentrador parabólico (CP).

Niveles:

- Helióstato con ángulo de elevación 1 (-)
- Helióstato con ángulo de elevación 2 (+)
- Sin atenuador (+)
- Con atenuador (-)
- Concentrador en posición 1 (-)
- Concentrador en posición 2 (+)

Tabla 3.1: Diseño factorial  $2^3$

N°	H	A	CP	Combinación	Réplicas			Promedio
					I	II	III	
1	-	-	-	---				
2	+	-	-	+- -				
3	-	+	-	- + -				
4	+	+	-	++ -				
5	-	-	+	-- +				
6	+	-	+	+ - +				
7	-	+	+	- + +				
8	+	+	+	+++				

El diseño factorial  $2^3$ , implica; variar o manipular tres variables como: Ángulo de elevación del Helióstato, apertura de las persianas del Atenuador y la posición del concentrador parabólico; cada una en dos niveles: mínimo (-) y máximo (+), Totalmente abierta (+) y semi abierta (-), Por debajo del eje focal (-) y en el eje focal (+); respectivamente.

Combinando los factores (variables) y sus niveles se obtendrá ocho combinaciones, los mismos que serán medidos y controlados bajo tres réplicas (tres repeticiones).

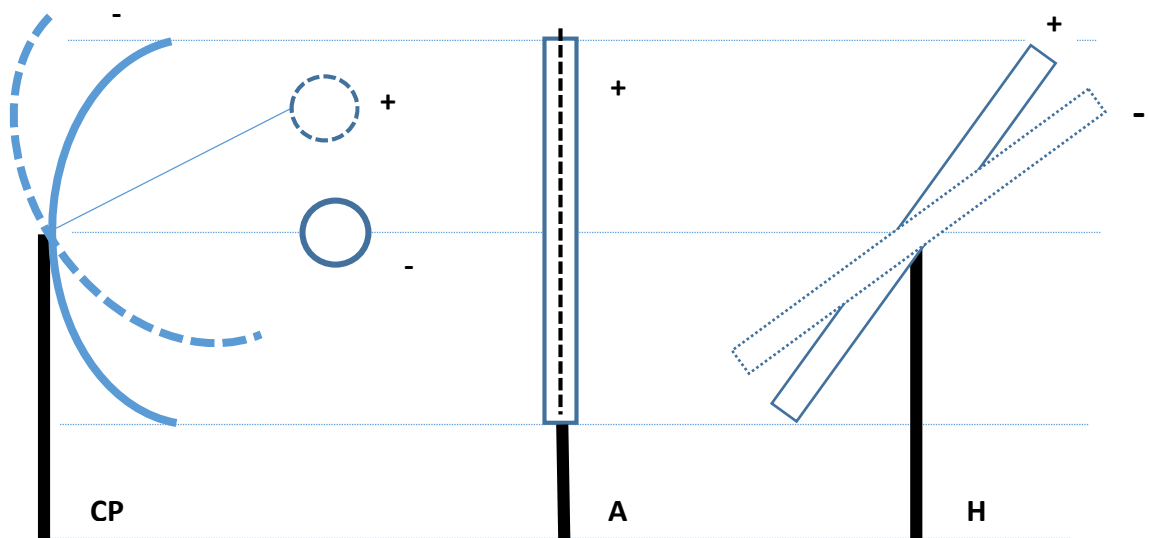


Figura 3.1: Configuración del Helióstato (H), Atenuador (A) y el Concentrador parabólico (CP), cada una en dos posiciones (+, -).

Fuente: Elaboración propia.

### 3.2 Unidad de Análisis








Está constituido por el objeto de estudio, es decir, por el Sistema Colector solar de incidencia indirecta, cuyos componentes son: Helióstato, Atenuador, Concentrador de disco y el receptor.

### 3.3 Población de Estudio

La población está constituido por el objeto de estudio, es decir, por el sistema colector solar de incidencia indirecta que se halla en condiciones climatológicas de Huancayo cuya temperatura oscila entre  $-5^{\circ}\text{C}$  a  $27^{\circ}\text{C}$

### 3.4 Tamaño de la Muestra



N°	Instrumento	Características
1		<p>Estación meteorológica con sensores de: temperatura, densidad y velocidad del viento. El modelo de esta estación es WS 501-UMB. El termómetro tiene el principio de NTC, rango de <math>-50^{\circ}\text{C}</math> a <math>60^{\circ}\text{C}</math>, con una incertidumbre de <math>\pm 0,2^{\circ}\text{C}</math>. El higrómetro tiene un principio capacitivo y rango de 0 a 100% de humedad relativa con una incertidumbre de <math>\pm 2\%</math>. El anemómetro tiene un principio ultrasónico y rango de 0 a 75 m/s con incertidumbre de <math>\pm 0,3</math></p>
2		<p>Estación actinométrica: compuesto por un piranómetro para la medición de radiación solar global y otra para medir la radiación difusa, ambos de marca Kipp Zonen, modelo CMP21 y tiene un principio termo detector con un rango de 0 a <math>4000\text{ W/m}^2</math> y margen de error de 1%</p>
3		<p>Pirheliómetro, marca Kipp Zonen, modelo CHP 1, mide la radiación directa, y tiene un principio termo detector con un rango de 0 a <math>4000\text{ W/m}^2</math> y margen de error de 1%</p>
4		<p>Seguidor solar automático SOLYS 2, con movimiento a <math>360^{\circ}</math>. con GPS integrado al nivel BSRN</p>
5		<p>Datalogger marca Campbell Scientific, modelo CR 1000X, mide las señales de sensores, controla las telecomunicaciones, analiza los datos, controla dispositivos externos y almacena datos y programas en su propia memoria no volátil. Tiene acceso a ordenador.</p>
6		<p>Pirómetro marca TROTEC, modelo TP7, rango de medición de <math>-50^{\circ}\text{C}</math> hasta <math>1000^{\circ}\text{C}</math>, resolución <math>0,1^{\circ}\text{C}</math>; indicador del objetivo Láser de clase II. Mide la temperatura de superficies sin contacto por medio de un sensor infrarrojo.</p>
7		<p>Medidor de irradiación de encuesta solar digital, marca TENMARS, modelo TM206, mide la irradiancia en <math>\text{W/m}^2</math></p>


8		Goniómetro marca Mitutoyo, mide el ángulo con mayor precisión, con graduación de 5'. Esto se utiliza para validar el ángulo de elevación del helióstato, y del concentrador.
---	---	--

Figura 3.2: Instrumentos utilizados en la investigación.

Para el registro de datos se utilizó las fichas de registro. Los parámetros que se midieron con la estación meteorológica fueron: Densidad absoluta y relativa, Presión atmosférica y la temperatura

### 3.7 Técnicas de Análisis de Datos

Para el análisis e interpretación de la información se utilizó las estadísticas Descriptiva e Inferencial. La estadística descriptiva se empleó para organizar los datos en tablas de frecuencia e histogramas, calcular los parámetros de tendencia central (media, mediana, moda) y variación (Valor mínimo, valor máximo, variancia, desviación estándar, error estándar), mientras que la estadística inferencial se ha utilizado para inferir los estadígrafos a parámetros, es decir, hacer el análisis en ocho combinaciones, luego inferir en otras combinaciones adicionales. La estadística inferencial también se utilizó para realizar la prueba de hipótesis, utilizando el estadístico ANOVA multifactorial.

## CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Parámetros meteorológicos del lugar (Radiación solar y temperatura)

Para medir la energía solar incidente en la superficie de la Tierra, la tecnología de medición que fue utilizado para la obtención de datos de la radiación solar directa y difusa, fue la estación actinométrica, para ello en primera instancia se seleccionaron los equipos de medición, luego se definió el lugar de instalación, tal es así, la estación actinométrica se instaló en la azotea del edificio central de la Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo; ubicado en una superficie plana horizontal, a una altura de 34 m respecto a la superficie del lugar, específicamente a 3 314 m.s.n.m. a una latitud de 12°3'54.5" S y longitud Oeste 75°12'17.5" O (Clemente, Alcántara, 2020). La estación contiene: un Piranómetro CMP 21 para monitorear la radiación global y un Piranómetro CMP 21 para radiación difusa; ambos tienen un rango de monitoreo hasta 4000 W/m<sup>2</sup>, clasificación a ISO 9060: 2018, además posee el Pirheliómetro CH1 que permite medir la radiación directa cuyo alcance es hasta 4000 W/m<sup>2</sup> avalado por la norma internacional ISO de primera clase; los mismos que están montados sobre un Tracker solar SOLYS 2 cuya puntería de seguimiento pasivo se halla entre 0.1° y 0.2° y seguimiento activo con sensor solar, además permite su interacción vía Ethernet/interfaz web, que sigue al movimiento del sol (Clemente, Alcántara, 2020). Todos ellos tienen un sistema de control, para ello se instaló un Datalogger marca CAMBELL CR 1000X, el mismo que registra datos cada minuto en promedio (es decir los datos que capta en menos de un segundo lo promedia), tal es así, su precisión de reloj en tiempo real es  $\pm 3$  min por año (corrección GPS opcional  $\pm 10\mu$ s).

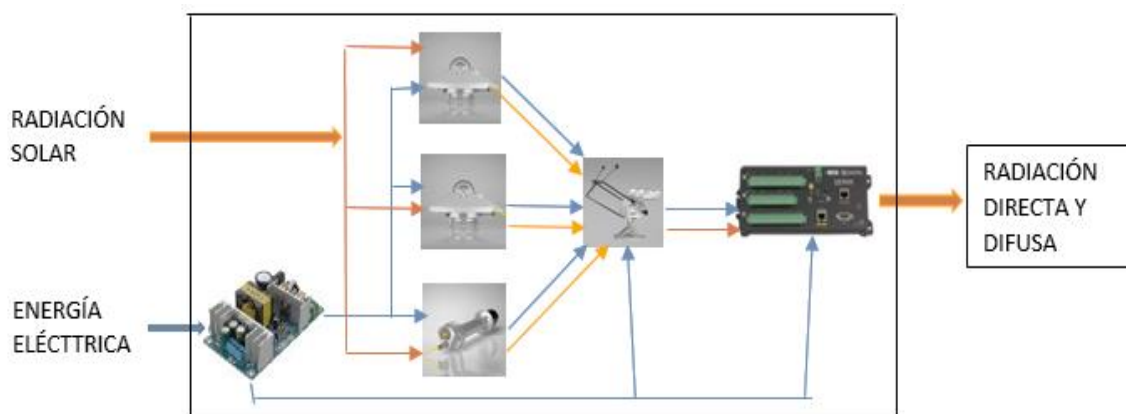
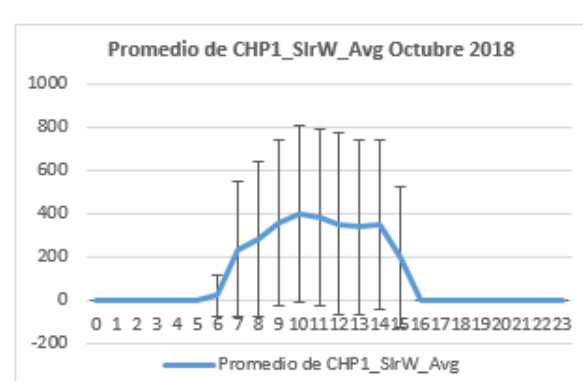
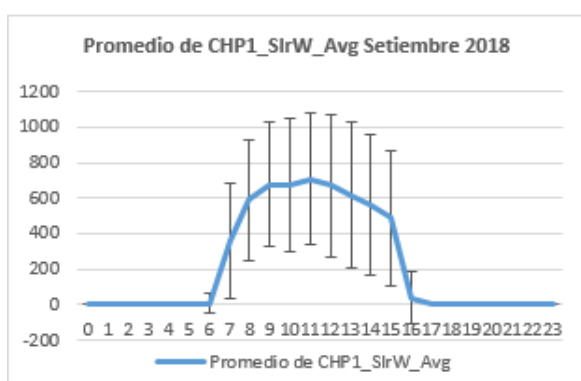
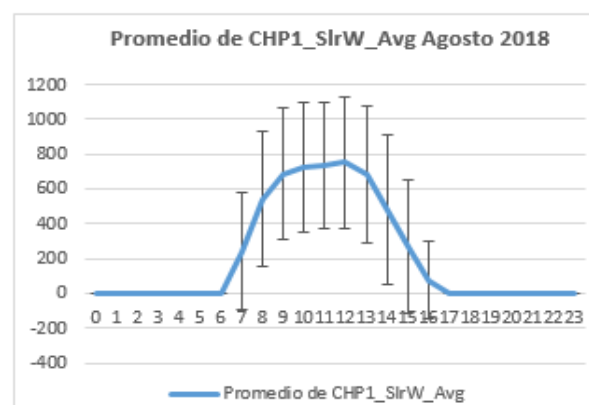
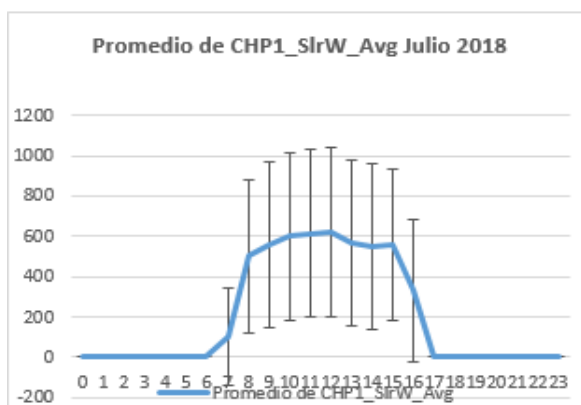


Figura 4.1; Proceso de medición de la radiación directa y difusa.

El datalogger registra datos a cada minuto, es decir, en una hora se registra 60 datos, en un día 1440, en un mes 43200 y en un año 518400 datos; a partir de este último se organiza y se hace el tratamiento con fines de representar en tablas y gráficos de manera comprimida (Clemente, Alcántara, 2020).

#### 4.1.1 Radiación directa

La medición de la radiación solar directa en  $W/m^2$  se hizo en el periodo de un año a través del Pirheliómetro Kipp Zonen, se inició el primero de julio del año 2018 y se culminó el 30 de junio del 2019; en este intervalo se tuvo 518 400 datos de radiación directa y la misma cantidad en radiación difusa; la organización se hizo por cada mes y dentro de éste se organizó por horas, es decir; en el eje de las abscisas ubicamos las horas y en el eje de las ordenadas ubicamos los promedios de las radiaciones incidentes directos en  $W/m^2$ , de los 30 días del mes, tal como se aprecian en las figuras siguientes (Clemente, Alcántara, 2020).



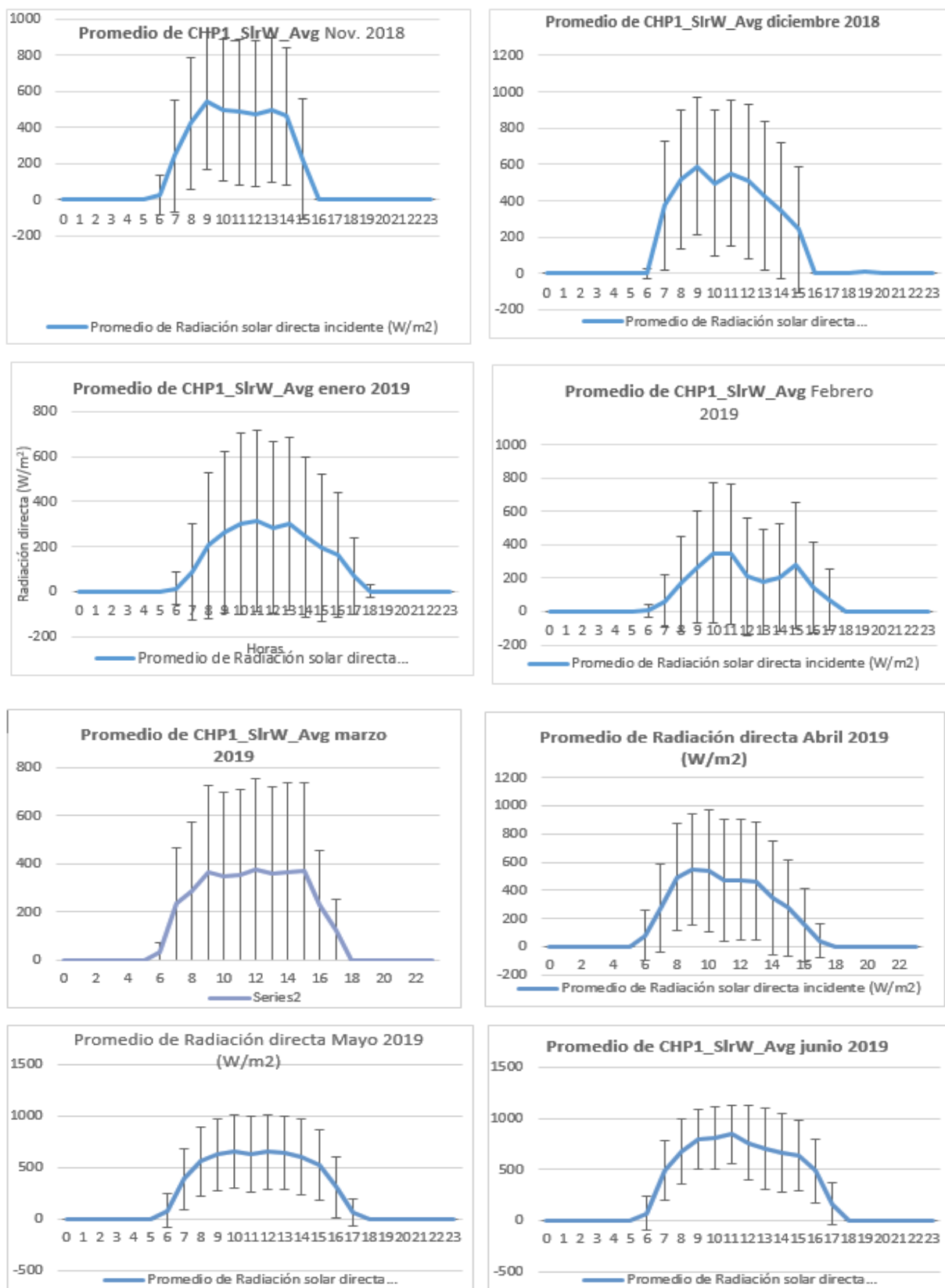
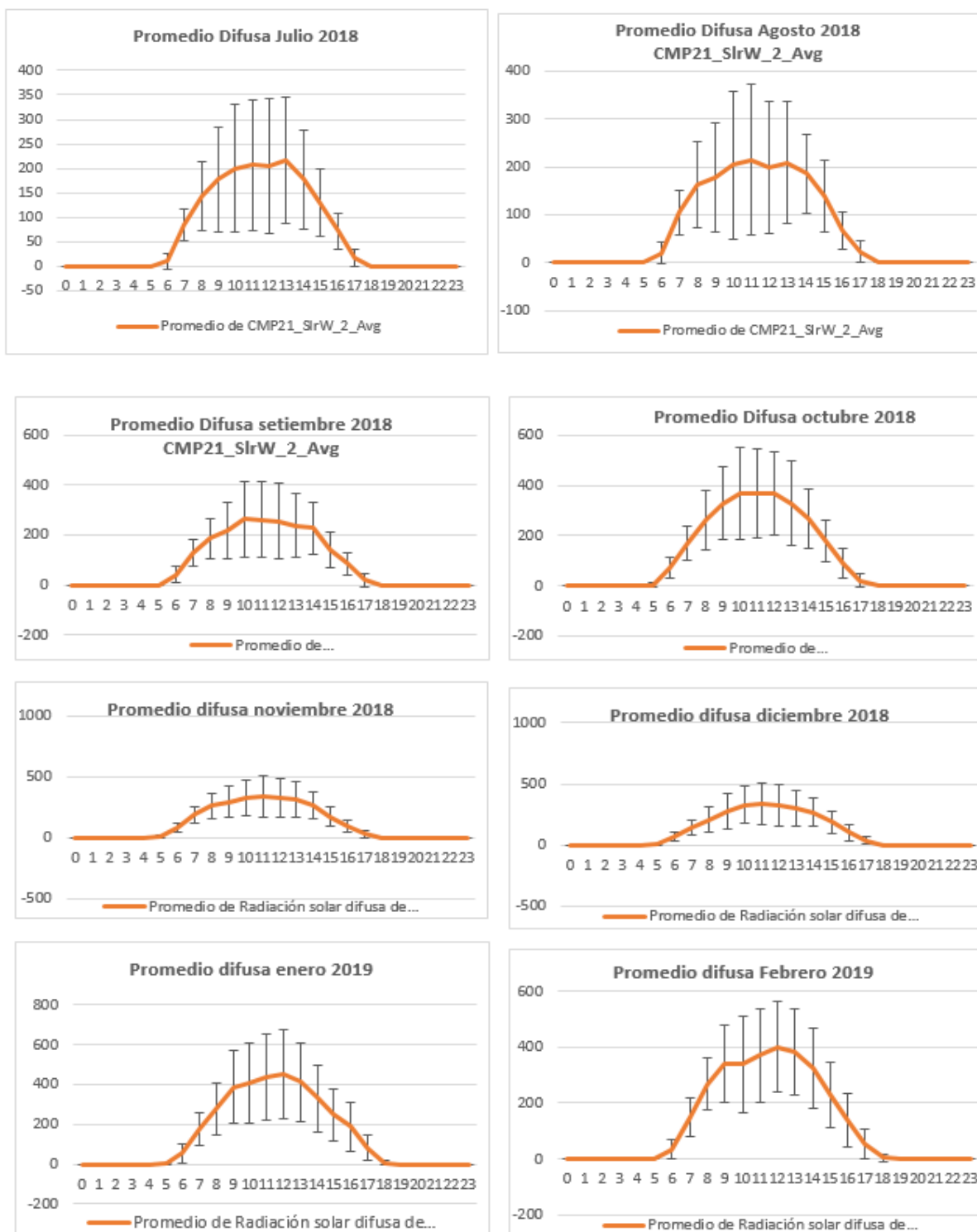


Figura 4.2; Radiación solar directa en  $W/m^2$  de doce meses (junio 2018-julio 2019). Fuente; (Clemente De la Cruz & Alcántara Boza, 2020)

### 4.1.2 Radiación Difusa.

La medición de la radiación solar difusa de onda corta se ha realizado a través de un Piranómetro Kipp Zonen CMP 21\_SlrW\_2\_Avg, en el mismo intervalo de tiempo que la radiación directa, en  $W/m^2$ , los mismos que se muestran a continuación:



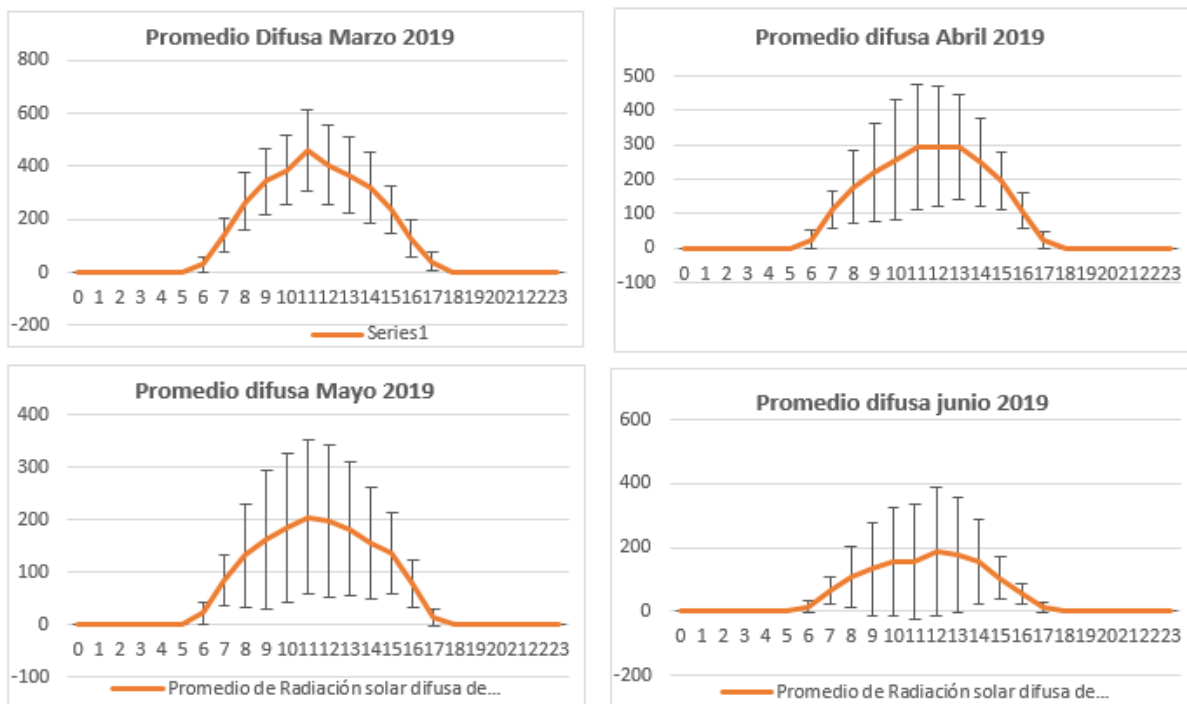


Figura 4.3; Radiación solar difusa en W/m2 de doce meses (junio 2018-julio 2019) (Clemente De la Cruz & Alcántara Boza, 2020).

El tratamiento estadístico de los datos se realizaron con la asistencia del software Excel, en particular de las tablas dinámicas y sus barras de error; que nos permitieron determinar la variación de la radiación solar directa y difusa. Además, mostramos la variación de la radiación a lo largo del mes y como muestra tomamos al mes de junio del 2019, ver figura 4.4 (Clemente De la Cruz & Alcántara Boza, 2020).

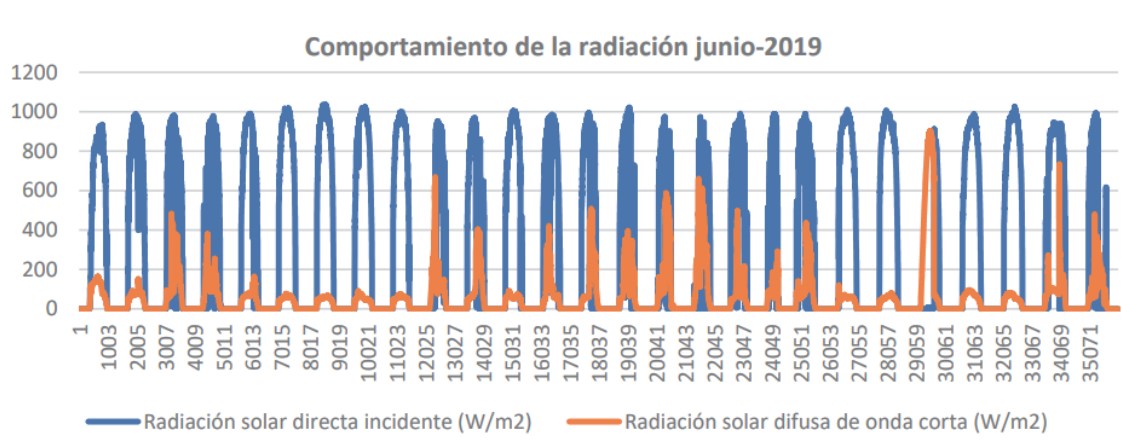


Figura 4.4. Variación de la radiación solar directa y difusa a lo largo del mes de junio 2019. Fuente; Clemente De la Cruz & Alcántara Boza (2020)

El comportamiento de la radiación directa y difusa tiene cierta similitud, y tienen una configuración polinómica de sexto orden, y está representado por:

$$y = -0.0011x^6 + 0.0845x^5 - 2.2723x^4 + 26.387x^3 - 121.89x^2 + 201.72x - 90.441$$

Con una correlación significativa de  $R=0,9562$

En resumen, la caracterización consiste en presentar los valores máximos, mínimos, y media, tanto de la radiación directa y su Desviación Estándar o variación, todo ello podemos apreciar en la tabla siguiente:

**Tabla 4.1:** Resumen de la caracterización de la radiación directa y difusa de onda corta

Mes-Año	Rad-Directa			Rad-Difusa			
	Min	Media	Max	Min	Min	Media	Max
Jul-18	0	209.184	622.432	0	0	40.875	137.020
Ago-18	0	216.287	752.3173	0	0	44.533	156.119
Set-18	0	224.5742	709.6602	0	0	46.61503	153.7498
Oct-18	0	120.6415	394.6842	0	0	56.91463	183.7819
Nov-18	0	161.6211	545.6513	0	0	51.67188	165.6989
Dic-18	0	169.2985	591.786	0	0	53.90067	168.9247
Ene-19	0	102.0403	314.2274	0	0	74.49678	222.7601
Feb-19	0	95.17861	351.5772	0	0	58.6369	171.1973
Mar-19	0	102.0317	308.6622	0	0	51.56929	152.4938
Abr-19	0	172.9235	548.1917	0	0	54.3304	182.9808
May-19	0	239.2533	657.3719	0	0	46.24803	147.5399
Jun-19	0	295.3094	843.5467	0	0	53.19015	199.4556

Fuente; Clemente De la Cruz & Alcántara Boza (2020)

La radiación directa de onda corta en promedio anual arroja 175,7 W/m<sup>2</sup>, y como máximo es de 553,3 W/m<sup>2</sup> y su variación o desviación estándar oscila entre 151.703 410.250, respectivamente; este último indica la presencia de nubes y partículas en el espacio, en algunos casos la variación es mayor a la radiación directa, es decir, en mayor porcentaje de los días hubo presencia de nubes (Clemente, Alcántara, 2020). La radiación difusa de onda corta también es significativo, tal es así, el promedio es 98,2 W/m<sup>2</sup> y el máximo es 297,3 W/m<sup>2</sup> y su variación se halla entre 52,7 y 170,1, respectivamente, esto corrobora la existencia de las nubes en el espacio. La radiación global es la suma de estos dos tipos de radiaciones y son éstas las que se aprovechan para diseñar dispositivos o sistemas solares de diverso uso (Clemente, Alcántara, 2020).

#### 4.1.3 Características meteorológicas

Los parámetros meteorológicos que tienen un impacto directo en el diseño o configuración de tecnologías solares para la generación de energía térmica es la temperatura ambiente, la humedad relativa del aire y la velocidad del viento; de éstas,

el más relevante es la temperatura. La variación de la temperatura ambiental en el Valle del Mantaro, alcanzó un máximo de 34°C en el mes de noviembre y un mínimo de -0.6°C en el mes de julio, con un promedio anual de 14.3°C, dentro del período de estudio (Figura 4.5), esta variación influye en el diseño de sistemas de concentración solar y tecnologías de aplicación industrial (C. Espinoza, Clemente, & Martinez, 2020).

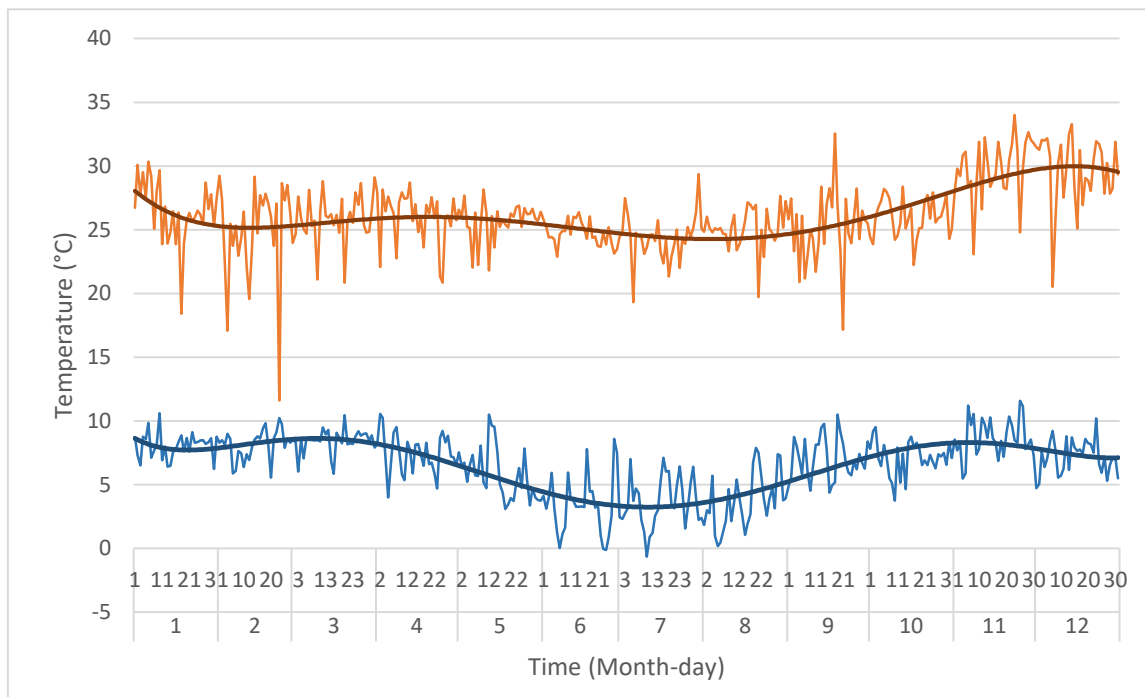


Figura 4.5. Variación de la temperatura máxima y mínima

La temperatura en un día en el Valle del Mantaro puede variar desde algunos grados hasta aproximadamente 20°C; generalmente la temperatura mínima del día se registra aproximadamente a las seis de la mañana, luego se incrementa hasta alcanzar la temperatura máxima alrededor del mediodía, para luego iniciar el descenso (Figura 4.6)

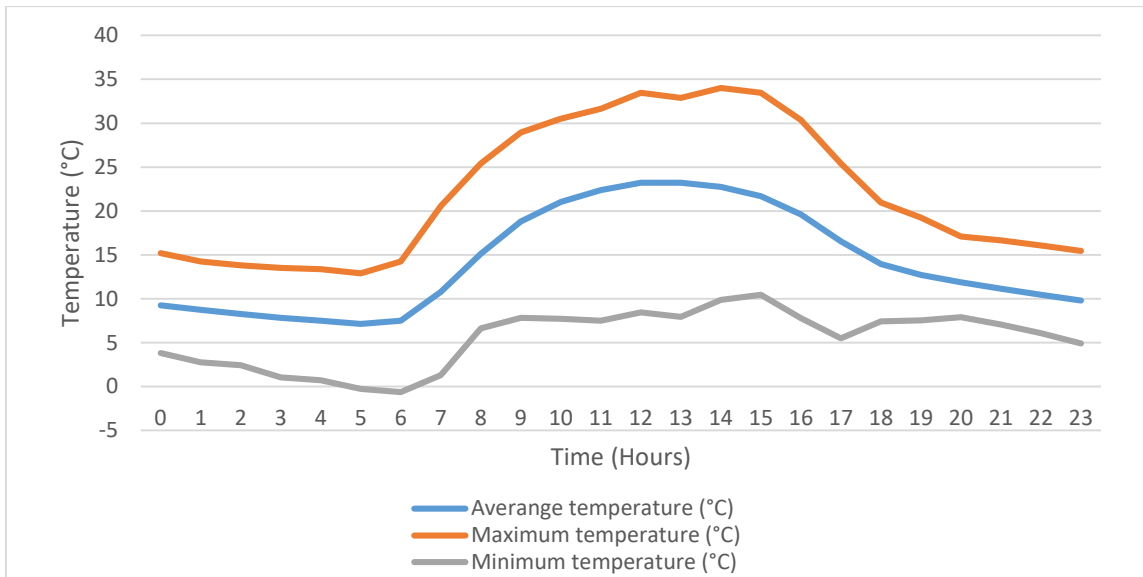


Fig. 4.6: Variación de la temperatura en un día-anual (C. Espinoza et al., 2020)

La humedad relativa promedio anual es de 61%, la humedad relativa máxima se experimentó en el mes de febrero, alcanzando al 88% y la humedad relativa mínima de 12% en el mes de julio, tal como se aprecia en la figura 4.7

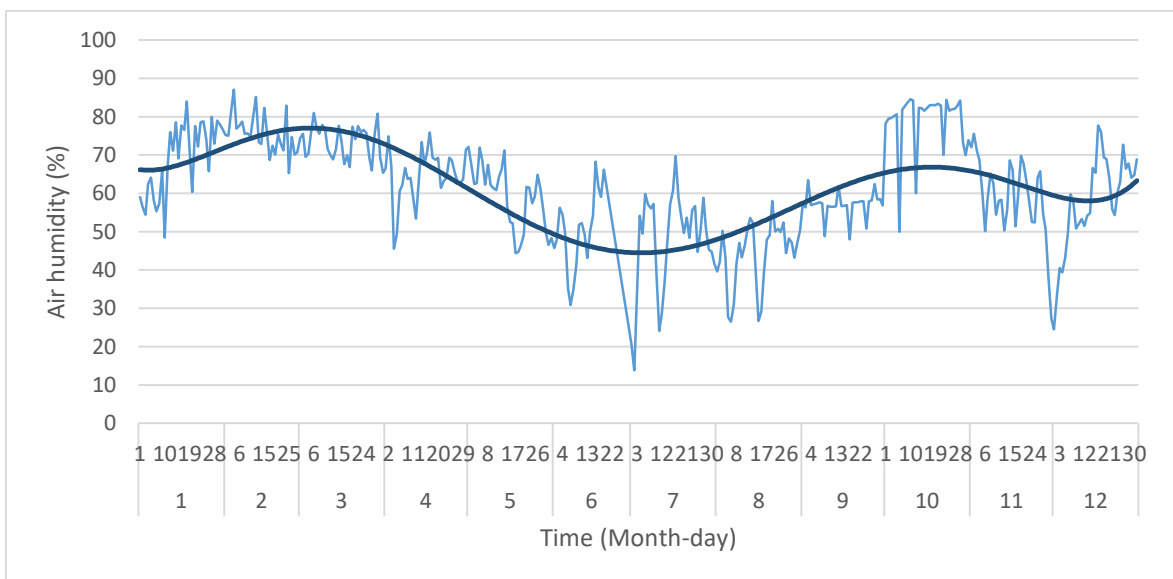


Fig. 4.7: Variación de la humedad del aire (C. Espinoza et al., 2020)

La velocidad del viento, promedio anual es de 2.7 m/s, experimentándose en los meses de julio y diciembre variaciones extremas, desde 0 m/s hasta 4.5 m/s. La velocidad del viento influye en la reflexión de la radiación solar y en consecuencia tiene efectos en la eficiencia de los sistemas solares de concentración.

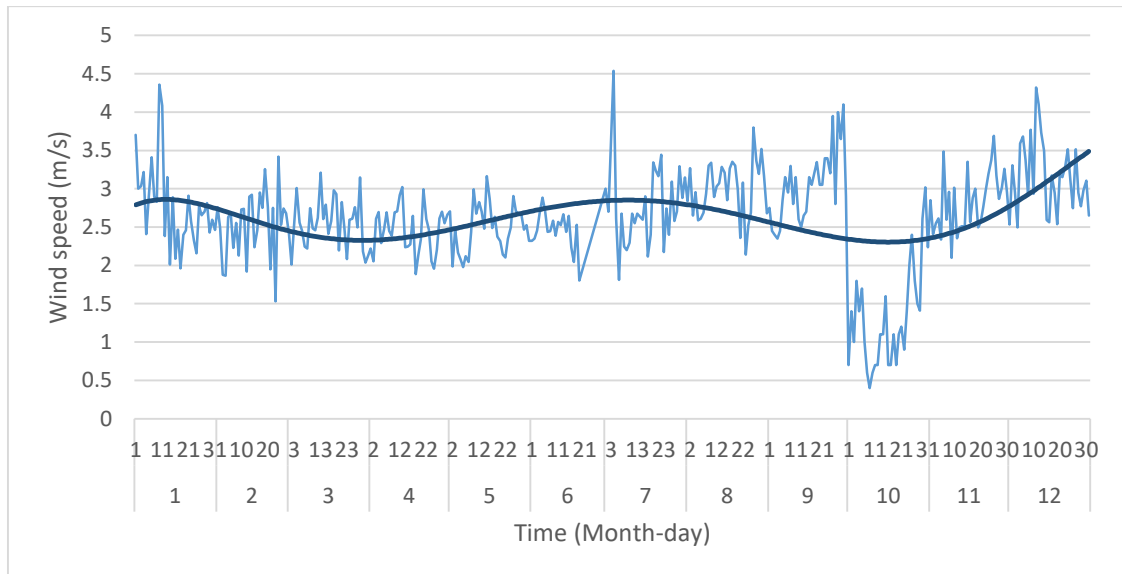


Fig. 4.8: Variación de la velocidad del aire (C. Espinoza et al., 2020)

## 4.2 Dimensionamiento del sistema colector solar de incidencia indirecta.

El sistema colector solar de incidencia indirecta está constituido por: un Helióstato, atenuador, concentrador y el receptor; los mismos que fueron dimensionados teniendo en consideración la disponibilidad de la tecnología de fabricación del concentrador solar en la región. Tal es así, la capacidad máxima del horno para el doblado del vidrio es de 1,2 m x 2,4 m x 1,5 m; es decir, el ancho máximo es 1,2 m, en consecuencia se decide construir un concentrador de disco de 1,2 m de diámetro.

### 4.2.1 Descripción de las necesidades

En la tabla 4.2, se muestra las necesidades para el diseño de un sistema solar de incidencia indirecta, teniendo en cuenta su jerarquía y su importancia, así como, la información sin procesar y el enunciado de la necesidad.

**Tabla 4.2;** Necesidades para el diseño de un sistema solar de incidencia indirecta

Información sin procesar	Enunciado de la necesidad	Jerarquía	Importancia
Se desea que el Helióstato capte la radiación solar y refleje con efectividad	Que el diseño garantice la reflexión de la radiación hacia el concentrador	4	x
Que la estructura otorga facilidades del movimiento de elevación y acimutal	Diseño con dos grados de libertad(dos ejes)	5	x

Que haya un control del paso del flujo de la radiación solar hacia el concentrador	Diseño de un atenuador	6	
Se desea que el concentrador irradie al punto focal con precisión	Que el diseño del perfil del concentrador sea preciso	2	
Se desea en el foco la temperatura sea superior a 200 °C	Temperatura en el foco mayor a 200°C	10	x
Se desea que el concentrador no esté construido con espejos fragmentados.	Fabricación del concentrador con espejo continuo cóncavo.	4	x
Se desea que la estructura del concentrador permita mover a lo largo del ángulo azimutal y de elevación	Estructura con dos grados de libertad	3	x
Que el receptor tenga un soporte adecuado	Soporte con movimiento lineal ascendente y descendente.	7	
Se desea que todos los componentes del sistema sea transportable.	Módulo transportable	8	
Se desea que el sistema no emita GEI al ambiente	Baja emisión del GEI	9	
Se desea que el sistema tenga consistencia y seguridad	Resistente a cargas estáticas y seguros	11	x

#### 4.2.2 Requisitos para el diseño

La lista de requisitos contiene el pliego de condiciones que permitirán medir el éxito del proyecto de diseño y se construye respondiendo a las preguntas: ¿Cuáles son los objetivos que la solución debe satisfacer?, ¿Qué propiedades debe tener? y ¿Qué propiedades no debe tener? (Pahl, Beitz, Feldhusen, & Grote, 2007). En base a esta metodología se define los requisitos tal como se muestra en la tabla 4.3.

**Tabla 4.3;** Lista de requisitos para el diseño del sistema

Item	Requerimiento	Componentes del sistema			
		Helióstatos	Atenuador	Concentrador	Receptor
01	Geometría	Altura total = 1600 mm Ancho total = 1300 mm Largo total = 1300 mm	Altura total = 1500 mm Ancho total = 1300 mm Largo total = 1300 mm	Altura total = 1600 mm Ancho total = 1300 mm Largo total = 1300 mm	Altura total = 900 mm Ancho total = 500 mm Largo total = 500 mm

		Espesor cristal = 5 mm	Altura persiana =1200 mm	Diámetro del plato = 1200 mm Distancia focal = 1000 mm Espesor cristal = 6 mm	
02	Cinemática:	Movimiento acimutal de 0° a 180° Movimiento de elevación de 0° a 90°	Giro de las persianas de 0° a 90°	Movimiento acimutal de 0° a 180° Movimiento de elevación de 0° a 90°	Movimiento lineal ascendente-descendente
03	Fuerzas:	Carga estática del cristal < 15 kg	Carga estática de la persiana < 5 kg	Carga estática del cristal < 20 kg	Carga estática del receptor < 10 kg
04	Energía:	Radiación solar global horizontal promedio = 6.8 kWh/m <sup>2</sup> . Reflexión óptima de radiación solar.	Control del flujo de radiación solar.	Radiación solar global horizontal promedio = 6.8 kWh/m <sup>2</sup> Energía térmica en el foco expresado en °C > 400°C	Energía térmica en el receptor
05	Material:	Para el Helióstato, espejo laminado de 6 mm. Para la estructura, Ángulo 1 ½" ASTM A-36	Tubo cuadrado acero ASTM 500. Persiana horizontal PVC	Para el concentrador, espejo laminado de 6 mm. Para la estructura tubo de acero rectangular ASTM A500	Tubo cuadrado acero ASTM 500.
06	Seguridad:	Seguridad del operador	Seguridad del operador	Seguridad del operador	Seguridad del operador
07	Ergonomía:	Altura de manejo adecuado, iluminación	Altura de manejo adecuado, iluminación	Altura de manejo adecuado, iluminación	Altura de manejo adecuado, iluminación
08	Fabricación:	Proceso de soldadura por arco eléctrico.	Proceso de soldadura por arco eléctrico.	Dimensión máxima del horno para la construcción del concentrador parabólico 1.2 m	Proceso de soldadura por arco eléctrico.
09	Montaje:	Facilidad en el ensamble	Facilidad en el ensamble	Facilidad en el ensamble	Facilidad en el ensamble
10	Transporte:	Sistema móvil con ruedas	Sistema móvil con ruedas	Sistema móvil con ruedas	Sistema móvil con ruedas
11	Mantenimiento:	Facilidad en el mantenimiento	Facilidad en el mantenimiento	Facilidad en el mantenimiento	Facilidad en el mantenimiento
12	Costo:	Admisible	Admisible	Admisible	Admisible

### 4.2.3 Diseño conceptual

En base al camino de la solución básica mediante la elaboración de un principio de solución (Pahl et al., 2007). Se define el objeto de diseño a través de la caja negra, ver figura 4.9, en términos de funciones.

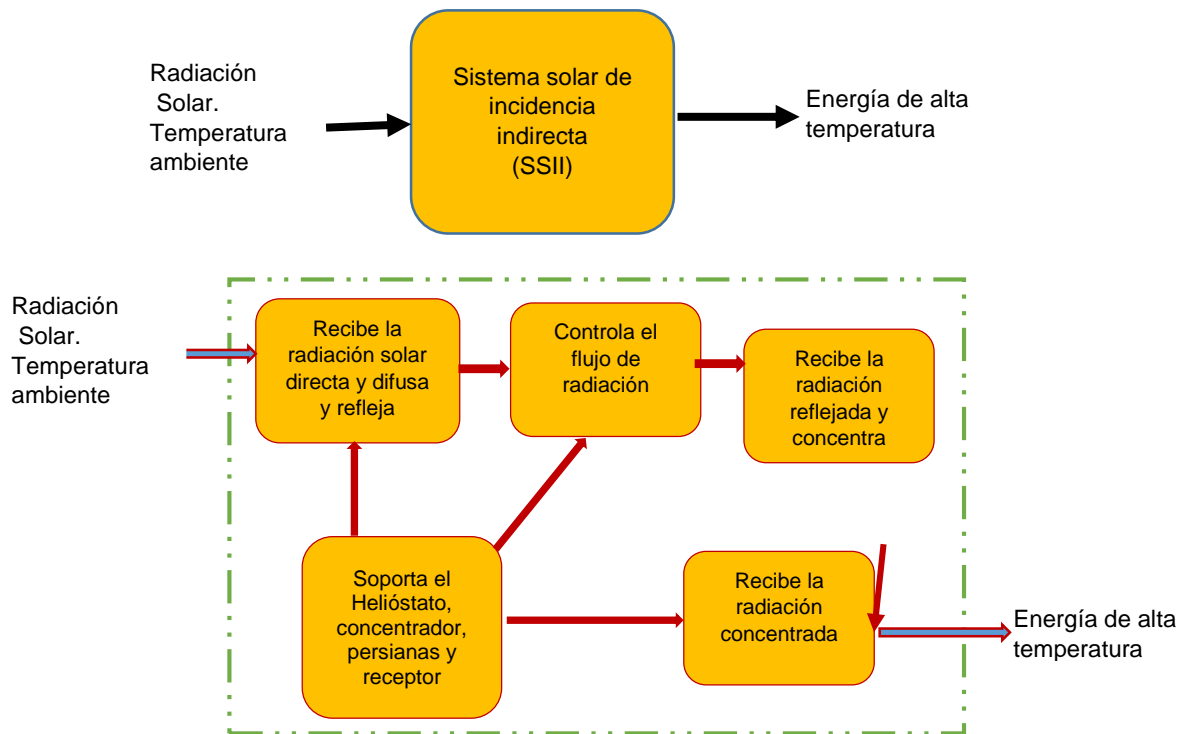


Fig. 4.9: Función general del SSII

En consecuencia, se identifica tres sub funciones del SSII que son parte de los componentes del sistema, tal como se muestra en la tabla 4.4.

Tabla 4.4: Atributo, funciones y principios tecnológicos del SSII

Atributo	Acción	Flujo	Función	principio
Helióstato	Recepción y reflexión	Radiación solar directa y difusa	Recibe la Radiación solar directa y difusa, luego refleja	Óptico
Atenuador	Controla	Radiación solar reflejada	Controla el paso del flujo de radiación reflejada	Óptico
Concentrador solar	Recepción, reflexión y concentración	Radiación solar reflejada	Recibe la radiación solar reflejada y concentra	Óptico
Receptor	Recepción	Radiación reflejada	Recibe la radiación concentrada	Óptico

Soporte estructural	Soporte	Carga	Soporta el Helióstató, concentrador, atenuador y receptor	Estático Grado de libertad
---------------------	---------	-------	---	-------------------------------

#### 4.2.4 Solución conceptual

Se basa en la matriz morfológica, es decir, para cada función o atributo existen diversas alternativas de solución y combinando el principio de función, se halla una solución global en forma de una posible estructura de trabajo. En este proceso solo aquellos que trabajan los principios que son compatibles deben combinarse.

Tabla 4.5: Matriz morfológica del SSII

Funciones parciales	Principios tecnológicos		
	Alternativa 01	Alternativa 02	Alternativa 03
Recibe la Radiación solar directa y difusa, luego refleja	Espejo Lineal de 3 mm	Espejo Lineal de 5 mm	Espejo Lineal de 6 mm
Soporta al helióstató	Estático	Con un grado de libertad	Con dos grados de libertad
Controla el paso del flujo de radiación reflejada	Persiana vertical PVC	Persiana horizontal PVC	Persiana vertical de aluminio
Soporta las persianas	Pórtico de aluminio	Pórtico de acero	Pórtico de madera
Recibe la radiación solar reflejada y concentra	Espejo cóncavo continuo	Espejo cóncavo seccionado	Superficie cóncavo de aluminio anodizado
	Sector central de la parábola	Sector lateral de la parábola	Sector de la esfera
Soporta al espejo cóncavo	Estático	Con un grado de libertad	Con dos grados de libertad
Recibe la radiación concentrada	Agua	Sal	
Soporta al receptor	Estático	Con un movimiento lineal dos posiciones	Con un movimiento lineal tres posiciones
SOLUCIÓN	Solución I	Solución II	Solución III

La tabla 4.5, muestra las combinaciones de las tres alternativas, generando también tres soluciones, de éstas, la solución 3 es la principal, por cumplir las exigencias o requisitos de diseño, la representación de ésta se muestra en la figura 4.10 y el anexo 01.

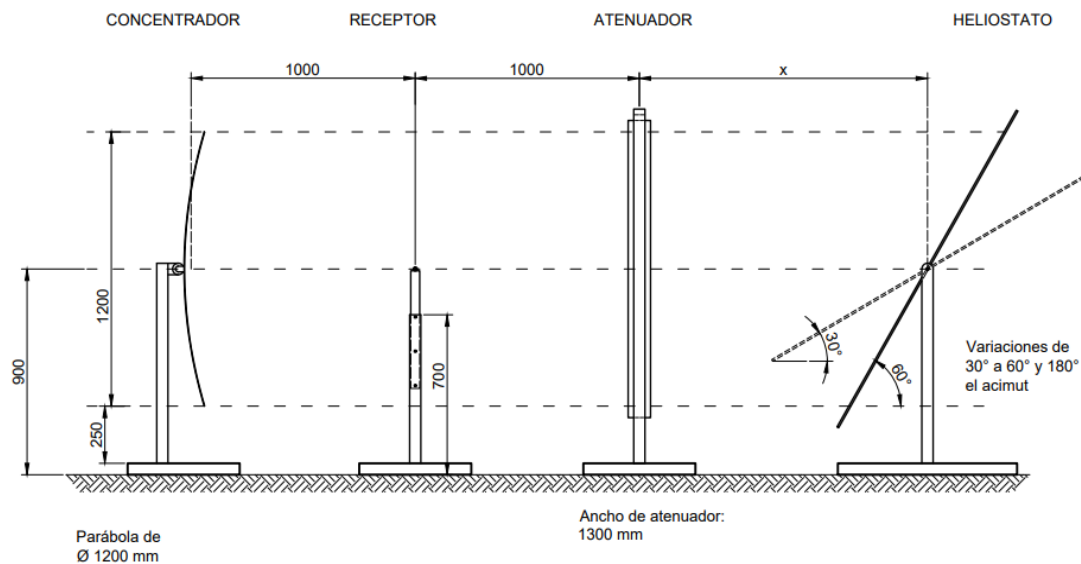


Fig. 4.10: Solución principal del SSII, utilizando la combinación de la tabla 4.5

#### 4.2.5 Evaluación de variantes de la solución principal

En base al VDI 2225 (Pahl et al., 2007), evaluamos la fase conceptual, tanto las características técnicas como las económicas, teniendo en cuenta las exigencias de la tabla 02; los mismos que mostramos en la tabla 4.6 y 4.7.

Tabla 4.6; Evaluación técnica de las soluciones

Criterios técnicos	Soluciones		
	I	II	III
1) Acción sobre el flujo	3	2	3
2) Modelo de funcionamiento	3	3	3
3) Ajuste fiable y precisa	2	2	4
4) Uso razonable de energía	3	3	4
5) Pocas piezas	4	2	3
6) Fabricación sencilla	3	2	2
7) Fácil montaje	3	2	3
8) Funcionamiento sencillo	3	3	3
9) Mantenimiento sencillo	2	2	3
10) Fácil utilización	3	4	4
<b>TOTAL</b>	<b>29</b>	<b>25</b>	<b>32</b>

$R_t = \frac{Total}{40}$	0,73	0.63	0.80
--------------------------	------	------	------

Tabla 4.7; Evaluación económica de las soluciones

Criterios económico	Soluciones		
	I	II	III
1) Bajo costo de material	3	2	3
2) Bajo costo de ensamblaje	2	3	4
3) Tiempo de prueba corto	2	3	3
4) Posibilidad de fabricar en taller propio	3	3	2
5) Bajo costo de fabricación	3	3	3
TOTAL	13	14	15
$R_e = \frac{Total}{20}$	0,65	0.70	0.75

En función al ratio técnico y económico se construye la relación que existe entre éstos dos parámetros, tal como se muestra en la figura 4.11.

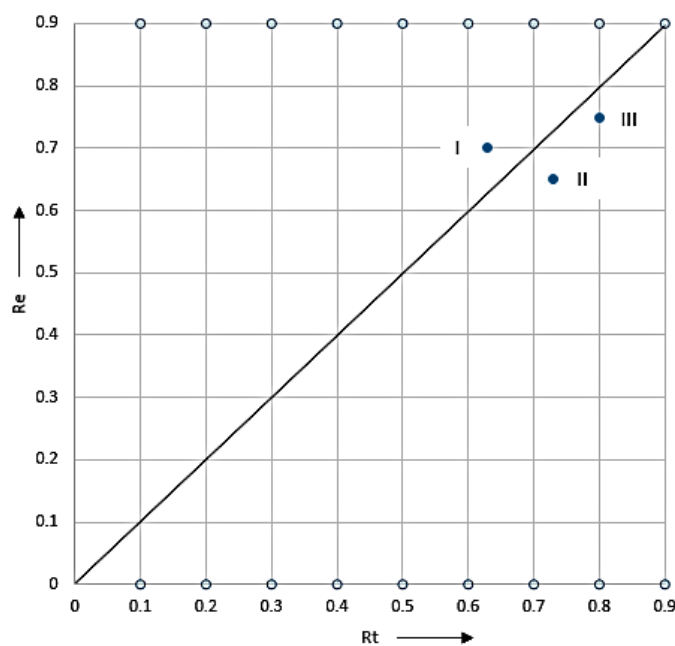


Fig. 4.11: Comparación de las calificaciones técnicas y económicas

Como se puede apreciar en la figura 4.10, la opción principal favorable es la solución III, debido a que se halla al lado derecho superior y muy próximo a la línea diagonal.

### 4.3 Configuración definitiva

#### 4.3.1 Dimensionamiento del Helióstato

En base a los planteamientos de Roldan Serrano (2013), para el dimensionamiento se ha tomado en cuenta el diámetro de apertura del concentrador que es 1.20 m, la latitud del lugar  $12.0313669^\circ$  S, Declinación  $23.5^\circ$  y los Ángulos de elevación de solsticio y equinoccio en el Valle del Mantaro (C. Espinoza et al., 2020). Ver figura 4.12

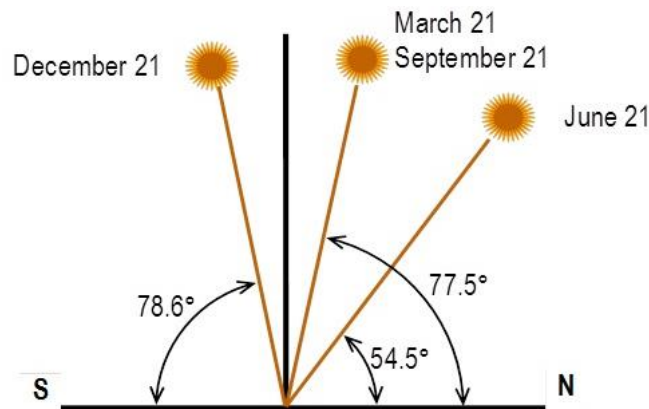


Fig. 4.12: Ángulos de elevación de solsticio y equinoccio en el Valle del Mantaro (C. Espinoza et al., 2020).

Para la estructura se tuvo en consideración los requisitos de resistencia y rigidez, los grados de libertad, es decir, movimiento en dos ejes. Las características geométricas y de resistencia se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 4.8; Características geométricas de resistencia del Helióstato

Características	Valor
Geométricas:	
• Área del espejo	1.3 m <sup>2</sup>
• Ancho del espejo	1.0 m
• Largo del espejo	1.3 m
• Espesor del espejo	0.005 m
• Ángulo de elevación	0° a 90°
• Ángulo de azimut	-90° a 90°
Meteorológicas:	
• Velocidad del viento	2.7 m/s
• Radiación directa promedio anual.	314 W/m <sup>2</sup>
• Radiación difusa promedio anual.	197.75 W/m <sup>2</sup>
• Presión del viento	4.47 Pa

Con estos parámetros, se ha definido las dimensiones y materiales del heliostato, tal como se muestra en la figura 4.13 y el detalle en anexo N° 02

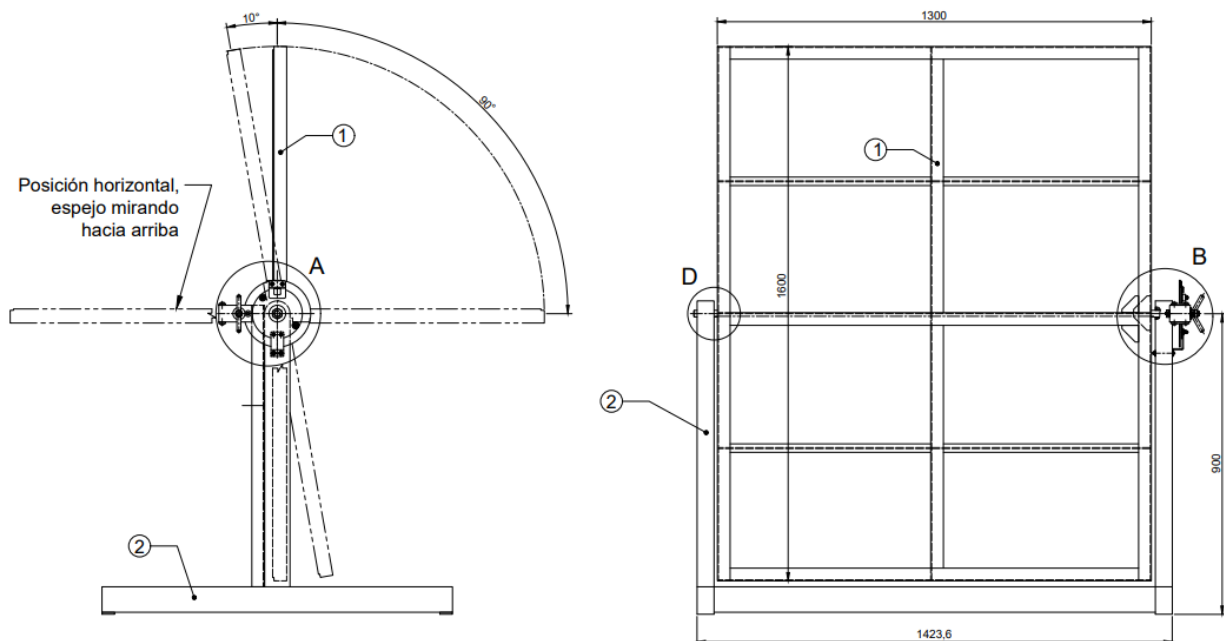


Fig. 4.13: Forma geométrica del heliostato con dos grados de libertad

#### 4.3.2 Dimensionamiento del atenuador

La posición del atenuador siempre está entre el heliostato y el concentrador, su construcción está en base a un conjunto de 25 láminas PVC (1.5 m de longitud, 0.05 m de anchura y 0.002 m de espesor), dispuestas de manera vertical, el giro de las láminas regula la potencia solar radiante que llega al concentrador, el mismo que oscila entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ .

La potencia solar radiante que incide en el concentrador, según Roldán Serrano (2013), se reduce en un factor del 2.46% con el atenuador completamente abierto, es decir, con las láminas posicionadas en un ángulo de  $90^\circ$  respecto al eje horizontal. “Al ser constante el área del receptor en el foco, la potencia radiante, es proporcional a la irradiancia que pasa a través del atenuador y la precisión en su regulación es proporcional a la precisión del movimiento de las lamas” (Roldán Serrano, 2013).

En consecuencia, las láminas en posición cerrada, forman un ángulo de  $0^\circ$  respecto al eje horizontal y en posición totalmente abierta forma un ángulo de

90° respecto al mismo eje. Las láminas están unidas por ambos extremos hacia los bastidores.

La estructura está compuesta por perfiles cuadradas de 50mm x 50 mm x 2 mm, de acero ASTM A-500, para garantizar su consistencia y rigidez, ver figura 4.14 y anexo 03.

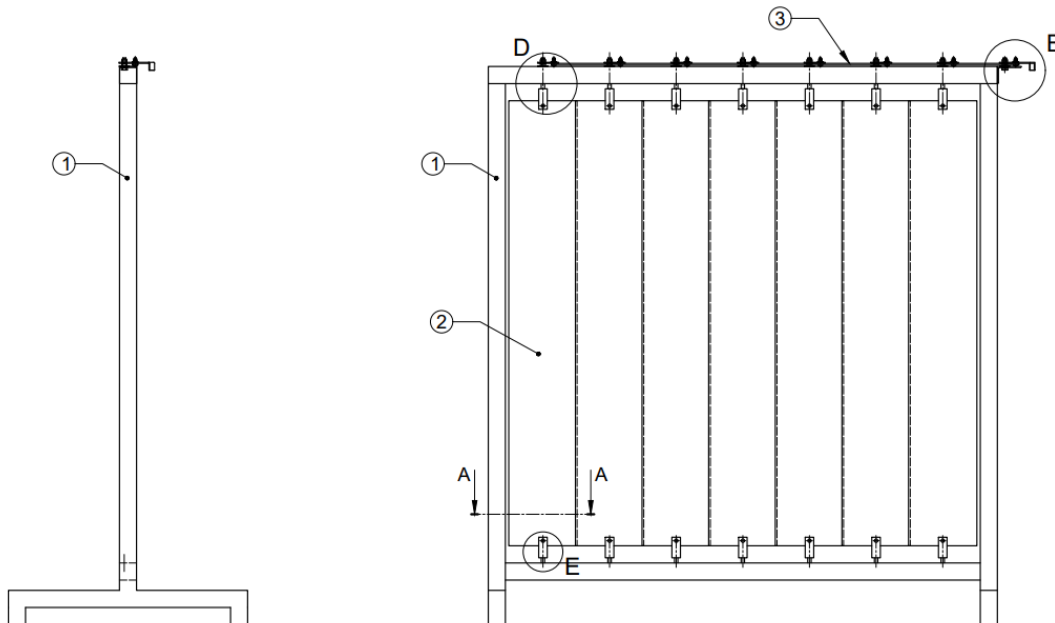


Fig. 4.14: Forma geométrica del atenuador

### 4.3.3 Dimensionamiento del Concentrador

Para el dimensionamiento del concentrador se tuvo en consideración el paraboloides, que es una superficie parabólica de revolución, que se le da a los concentradores de plato (Lovegrove & Stein, 2021).

El diseño del concentrador solar de disco parabólico se desarrolla mediante modelos matemáticos que se inician con la ecuación general de la parábola y la vista de sección del disco parabólico representado en las figuras 4.15 y 4.16.

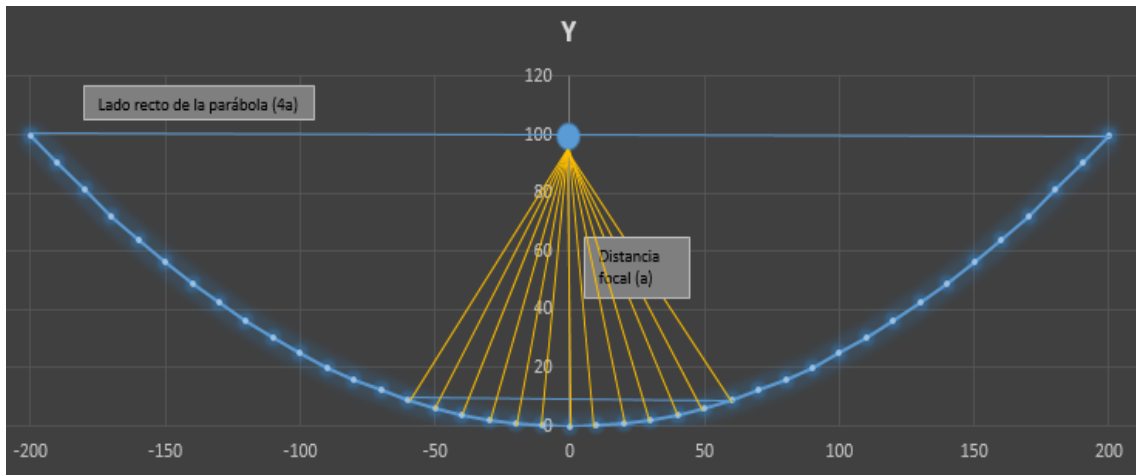


Figura 4.15: Perfil geométrico del concentrador

De este perfil, se toma el sector central, cuyo modelo matemático se representa con la ecuación general de la parábola y la vista de sección del disco parabólico representado en la figura 4.15.

$$x^2=4fy \tag{1}$$

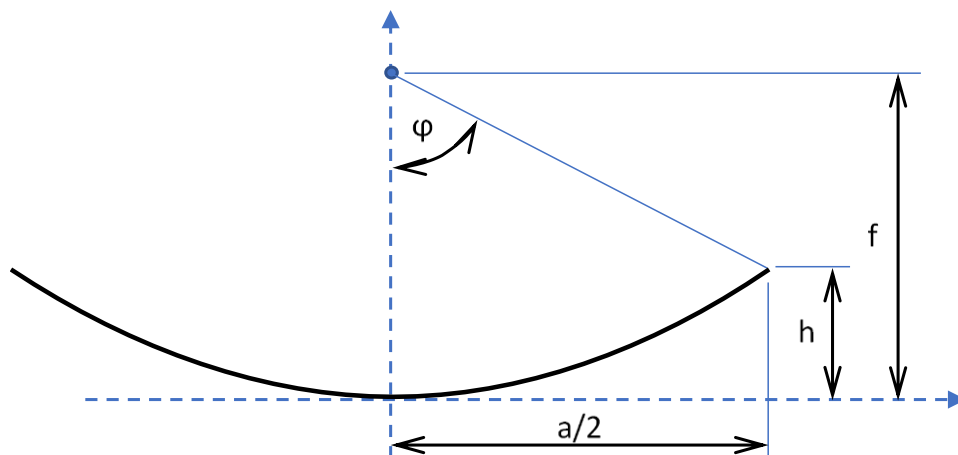


Figura 4.16: Vista de sección del disco parabólico

La altura de la parábola es la distancia entre la longitud focal y el ancho de apertura que está relacionada con la ecuación.

$$h=a^2/16f \tag{2}$$

El ángulo del borde de la depresión de la parábola se estima mediante la relación.

$$\phi=\text{arccotan}(a/(2(f-h))) \tag{3}$$

La relación de concentración es la relación entre el área de apertura y el área de la cara del absorbedor que se puede definir mediante la ecuación.

$$R_c = A_d / A_a = a^2 / d^2 \quad (4)$$

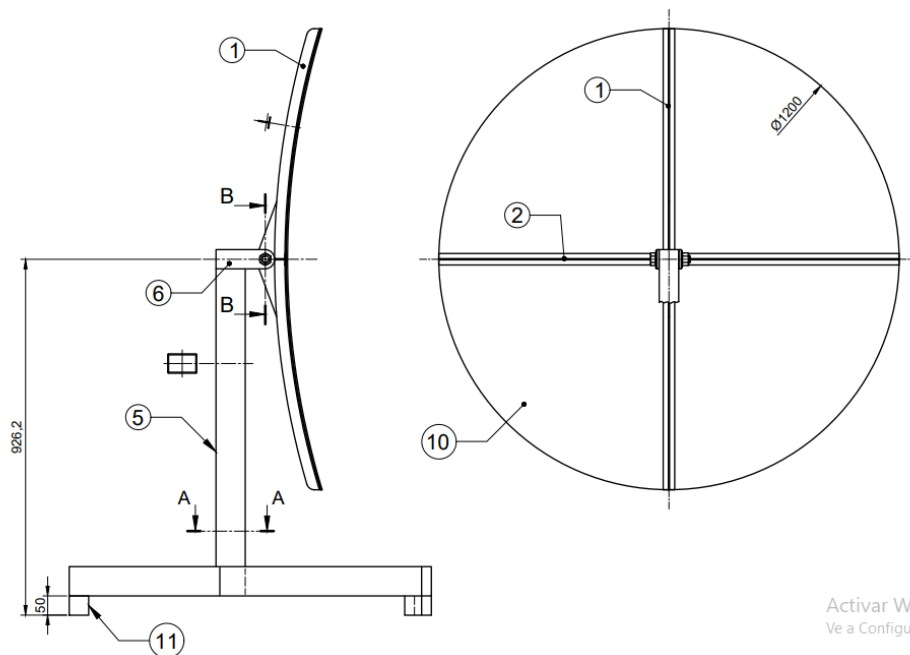
En la tabla 4.9, se muestran los diversos parámetros del concentrador, calculados con las ecuaciones 1, 2, 3 y 4.

Tabla 4.9: Parámetros de diseño calculados del concentrador solar de disco

Parámetros	Dimensiones
Latitud	12.0314° S
Longitud	73,2353° O
Irradiación solar (I)	314 w/m <sup>2</sup>
Diámetro de disco (a)	1,2 m
Área de apertura (A <sub>d</sub> )	1.13 m <sup>2</sup>
Ángulo de borde (φ)	33,4°
Distancia focal (f)	1,00 m
Diámetro del absorbedor (d)	0,2 m
Área del absorbedor (A <sub>a</sub> )	0,031 m <sup>2</sup>
Altura de la parábola (h)	0.09 m
Relación de concentración (R <sub>c</sub> )	36
Reflectividad (α)	0,9
Transmisividad (ρ)	0,9
Emitancia del absorbente (ε)	0,7
Constante de Stefan Boltzmann(σ)	5.67x10 <sup>-8</sup> w/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup>
Temperatura del fluido de entrada (Te=14.3°C)	288°K

Nota: Tomado de Clemente(2021)

Con los parámetros de la tabla 4.9, se tiene las características del concentrador tal como se muestra en la figura 4.17 y anexo 04 y 05.



Activar Windc  
Ve a Configuració

Figura 4.17: Concentrador de disco parabólico

El cálculo de la temperatura de equilibrio máximo se determina mediante la ecuación 5, suponiendo una transmisión perfecta de radiación hacia el absorbente (Gonzales, 2013).

$$T_{c\ max}^4 = \frac{\alpha^{oc} \cdot X \cdot G_{\Omega} \cdot \rho_c}{\varepsilon_{ol} \sigma} + T_e^4 \quad (5)$$

La temperatura máxima que puede alcanzar el concentrador solar de disco, con los parámetros de diseño de la tabla 4.9, es de 698°K (425°C).

#### 4.3.4 Dimensionamiento del Receptor

El dispositivo que va a soportar un receptor simple cilíndrico, es una estructura encargada de posicionar el receptor en el foco del concentrador, tiene un movimiento lineal vertical, tal como se aprecia en la figura 4.18.

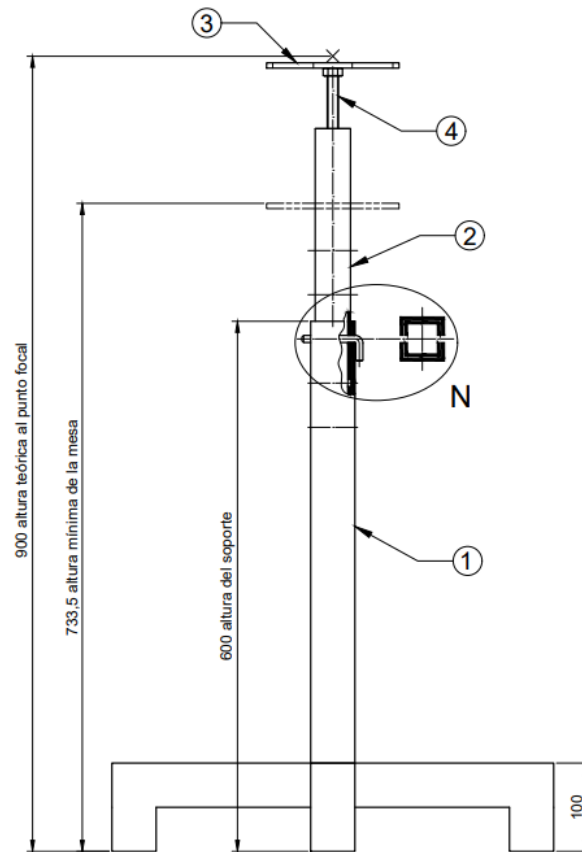


Figura 4.18: Estructura del receptor del sistema solar de incidencia indirecta.

Los planos de fabricación de todos los componentes del sistema solar de incidencia indirecta, se muestran en el anexo 06.

#### 4.3.5 Construcción del prototipo.

El disco parabólico del prototipo se construyó con vidrio de 5 mm de espesor y 1,4 m de diámetro, el mismo que se sometió a un molde para generar una curvatura de la parábola de 1,2 m de diámetro, de 1 m de distancia focal y 0,09 m de altura de la parábola. El vidrio se conformó en un horno a 500°C aproximadamente. El resto de los componentes se construyó de acero estructural (Figura 4.19).



Figura 4.19: Prototipo del concentrador solar de disco

El Helióstato se ha construido con espejo plano de 5mm de espesor, largo de 1,6m y ancho 1,3m. La estructura se ha construido con perfiles de acero, tal como se aprecia en la figura 4.20.



Figura 4.20: Prototipo del Helióstato.

El atenuador se ha construido con perfiles cuadrados de acero estructural de 2"x2" y persianas de PVC dispuestos verticalmente (Figura 4,21)



Figura 4.21: Prototipo del atenuador

Finalmente tenemos el prototipo de la estructura del receptor que se ubica en foco del concentrador, la construcción de esta estructura se hizo con perfiles de acero estructural (figura 4.22).



Figura 4.22: Prototipo de la estructura del receptor.

#### 4.3.6 Montaje de los componentes del sistema solar de incidencia indirecta.

La instalación del módulo **sistema solar de incidencia indirecta**, se realizó en la azotea del Laboratorio de energías renovables de la Universidad Nacional del Centro del Perú, tal como se ilustra en la figura 4.23



Figura 4.23: Montaje-componentes del sistema solar de incidencia indirecta

#### 4.4 Definición de factores y niveles para el diseño factorial $2^k$

Los factores están relacionados con los componentes del sistema, tal como; Helióstato, Atenuador y el concentrador; los mismos que fueron configurados a dos niveles, como se muestra en la tabla 4.10.

Tabla 4.10

Configuración de factores y niveles

Factores	Niveles
Helióstato (H)	Angulo de elevación 40° (-)
	Angulo de elevación 50° (+)
Atenuador (A)	Sin atenuador (-)
	Con Atenuador (+)
Concentrador (C)	Eje focal a 0° (-)
	Eje focal a 13° (+)

En consecuencia, los factores son tres, es decir,  $k=3$ , por tanto el diseño es  $2^3$ . Lo que se pretende en primer lugar, es buscar cómo afecta los factores con sus

niveles a la generación de energía térmica y luego definir la mejor combinación en función a la temperatura en el foco del concentrador (absorbedor). Para este hecho se ha definido los niveles alto (+) y bajo (-) a fin de elaborar la matriz de diseño (Box, Hunter y Hunter, 2011), (Montgomery, 2013).

Tabla 4.11; Matriz de diseño factorial y notación geométrica

Corrida	H	A	C	Etiqueta	H	A	C
1	-	-	-	(1)	-1	-1	-1
2	+	-	-	h	+1	-1	-1
3	-	+	-	a	-1	+1	+1
4	+	+	-	ha	+1	+1	-1
5	-	-	+	c	-1	-1	+1
6	+	-	+	hc	+1	-1	+1
7	-	+	+	ac	-1	+1	+1
8	+	+	+	hac	+1	+1	+1

Nota; la notación -1 y +1, son los niveles bajo y alto respectivamente.

Para la estimación de las interacciones nos basamos a la tabla siguiente:

Tabla 4.12 Estimación de las interacciones

Etiqueta	H	A	C	HA	HC	AC	HAC
(1)	-	-	-	+	+	+	-
h	+	-	-	-	-	+	+
a	-	+	-	-	+	-	+
ha	+	+	-	+	-	-	-
c	-	-	+	+	-	-	+
hc	+	-	+	-	+	-	-
ac	-	+	+	-	-	+	-
hac	+	+	+	+	+	+	+

Con la ayuda de la tabla 4.12, se establece las relaciones de interacción, tal como:

- $H = \frac{1}{4n} [h + ha + hc + hac - (1) - a - c - ac]$
- $A = \frac{1}{4n} [a + ha + ac + hac - (1) - h - c - hc]$
- $C = \frac{1}{4n} [c + hc + ac + hac - (1) - h - a - ha]$

- $HA = \frac{1}{4n} [(1) + ha + c + hac - h - a - hc - ac]$
- $HC = \frac{1}{4n} [(1) + a + hc + hac - h - ha - c - ac]$
- $AC = \frac{1}{4n} [(1) + h + ac + hac - a - ha - c - hc]$
- $HAC = \frac{1}{4n} [h + a + c + hac - (1) - ha - hc - ac]$

En base a estas ecuaciones se determinó la suma de cuadrados de las interacciones con el fin de construir la tabla ANOVA. Sin embargo el software Minitab determina todos estos parámetros.

La vista geométrica del diseño se muestra en la figura 4.24.

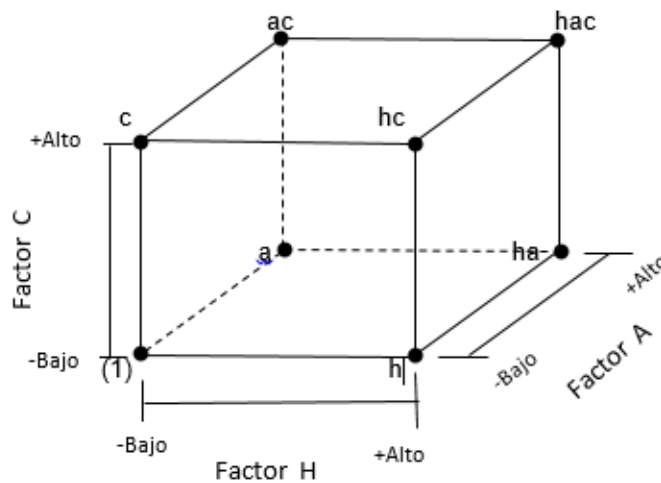


Figura 4.24: vista geométrica del diseño factorial  $2^3$

#### 4.5 Matriz de datos para el diseño factorial $2^3$ .

Los datos se recolectaron utilizando instrumentos como: Pirómetros, termómetro, medidor de irradiación y goniómetro, los mismos que se hallan descritos en el capítulo III. Las consideraciones que se tuvo en la medición fueron; Réplicas, temperatura ambiental, radiación directa, la radiación emitida por el helióstato, radiación emitida por el concentrador, la temperatura alrededor del receptor (absorbedor) y la temperatura en el absorbedor.

La medición se realizó en la azotea del Laboratorio de Energías renovables de la Universidad Nacional del Centro del Perú – Huancayo, con cielo despejado, tal como se aprecia en la figura 4.25.

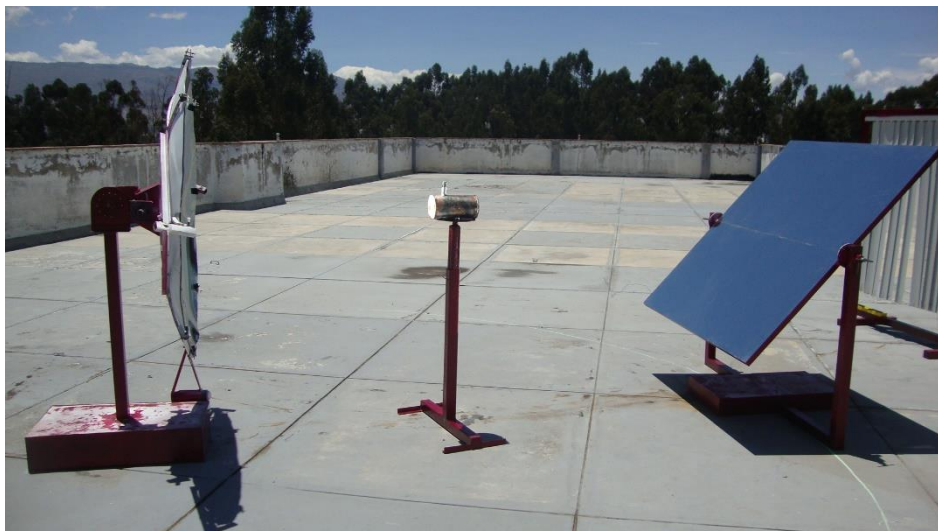


Figura 4.25: Disposición de los componentes del sistema para la medición

Los datos recolectados se muestran en la tabla 4.13.

Tabla 4.13

Datos de radiación y temperaturas para ocho combinaciones

<b>1) H40 – S/A – C 0° (- - -)</b>						
Réplica	Tem. Ambiental (°C)	Rad. directa (W/m <sup>2</sup> )	Rad. Helióst. (W/m <sup>2</sup> )	Radiación Concent. (W/m <sup>2</sup> )	Temp. contorno del receptor (°C)	Temp. en el absorbedor (°C)
R1	26,0	1134	790	635	82,2	230,2
R2	25,8	1104	580	550	79,0	222,4
R3	25,0	1094	520	410	74,6	194,2
<b>2) H50 – S/A – C 0° (+ - -)</b>						
Réplica	Tem. Ambiental (°C)	Rad. directa (W/m <sup>2</sup> )	Rad. Helióst. (W/m <sup>2</sup> )	Radiación Concent. (W/m <sup>2</sup> )	Temp. contorno del receptor (°C)	Temp. en el absorbedor (°C)
R1	24,7	1090	623	495	80,1	193,6
R2	24,5	1070	580	408	72,6	186,4
R3	24,1	1050	544	371	70,4	161,8
<b>3) H40 – C/A – C 0° (- + -)</b>						
Réplica	Tem. Ambiental (°C)	Rad. directa (W/m <sup>2</sup> )	Rad. Helióst. (W/m <sup>2</sup> )	Radiación Concent. (W/m <sup>2</sup> )	Temp. contorno del receptor (°C)	Temp. en el absorbedor (°C)
R1	25,4	1080	570	542	72,4	202,4
R2	23,8	1056	536	460	70,2	162,8
R3	22,2	1032	512	422	66,8	150,4
<b>4) H50 – C/A – C 0° (+ + -)</b>						

Réplica	Tem. Ambiental (°C)	Rad. directa (W/m <sup>2</sup> )	Rad. Helióst. (W/m <sup>2</sup> )	Radiación Concent. (W/m <sup>2</sup> )	Temp. contorno del receptor (°C)	Temp. en el absorbedor (°C)
R1	23,6	1032	795	431	71,6	176,4
R2	23,1	1018	784	420	68,9	163,2
R3	21,2	823	634	342	64,1	136,2
<b>5) H40 – S/A – C 13° (- - +)</b>						
Réplica	Tem. Ambiental (°C)	Rad. directa (W/m <sup>2</sup> )	Rad. Helióst. (W/m <sup>2</sup> )	Radiación Concent. (W/m <sup>2</sup> )	Temp. contorno del receptor (°C)	Temp. en el absorbedor (°C)
R1	24,5	1081	831	450	73,2	186,2
R2	22,8	1012	777	417	68,1	160,4
R3	22,2	916	703	349	67,6	144,5
<b>6) H50 – S/A – C 13° (+ - +)</b>						
Réplica	Tem. Ambiental (°C)	Rad. directa (W/m <sup>2</sup> )	Rad. Helióst. (W/m <sup>2</sup> )	Radiación Concent. (W/m <sup>2</sup> )	Temp. contorno del receptor (°C)	Temp. en el absorbedor (°C)
R1	23,1	1011	775	418	70,8	170,2
R2	23,0	879	758	397	68,4	141,8
R3	22,5	803	681	334	60,2	124,0
<b>7) H40 – C/A – C 13° (- + +)</b>						
Réplica	Tem. Ambiental (°C)	Rad. directa (W/m <sup>2</sup> )	Rad. Helióst. (W/m <sup>2</sup> )	Radiación Concent. (W/m <sup>2</sup> )	Temp. contorno del receptor (°C)	Temp. en el absorbedor (°C)
R1	24,8	1092	840	451	73,7	190,3
R2	24,1	1037	798	427	72,0	177,1
R3	23,7	1018	784	421	67,5	151,8
<b>8) H50 – C/A – C 13° (+ + +)</b>						
Réplica	Tem. Ambiental (°C)	Rad. directa (W/m <sup>2</sup> )	Rad. Helióst. (W/m <sup>2</sup> )	Radiación Concent. (W/m <sup>2</sup> )	Temp. contorno del receptor (°C)	Temp. en el absorbedor (°C)
R1	23,9	1022	787	423	70,3	164,2
R2	22,8	840	647	347	67,2	140,2
R3	20,1	796	613	329	60,1	120,8

Nota: H40 es el helióstato con ángulo de elevación de 40°, H50 es el helióstato con ángulo de elevación de 50°, S/A sin atenuador, C/A con atenuador, C 0° es el concentrador con eje focal horizontal y C 13° es el concentrador con eje focal 13° respecto a la horizontal.

En resumen, se define la matriz para el diseño factorial en base a los datos de la tabla 4.13, específicamente considerando los datos de la temperatura en el absorbedor, es decir, energía térmica de alta temperatura. Ver tabla 4.14.

Tabla 4.14

Matriz de datos para el diseño factorial

N°	H	A	C	Combinación	Réplicas			Promedio
					I	II	III	
1	-	-	-	H40 – S/A – C 0°	230.2	222.4	194.2	215.6
2	+	-	-	H50 – S/A – C 0°	193.6	186.4	161.8	180.6
3	-	+	-	H40 – C/A – C 0°	202.4	162.8	150.4	171.7
4	+	+	-	H50 – C/A – C 0°	176.4	163.2	136.2	158.6
5	-	-	+	H40 – S/A – C 13°	186.2	160.4	144.5	163.7
6	+	-	+	H50 – S/A – C 13°	170.2	141.8	124.0	145.3
7	-	+	+	H40 – C/A – C 13°	190.3	177.1	151.8	173.1
8	+	+	+	H50 – C/A – C 13°	164.2	140.2	120.8	141.7

#### 4.6 Representación gráfica de resultados de la investigación

Con los datos obtenidos en las réplicas del experimento, se ha verificado la normalidad y la homogeneidad de cada factor.

La figura 4.26 representa la normalidad de los datos

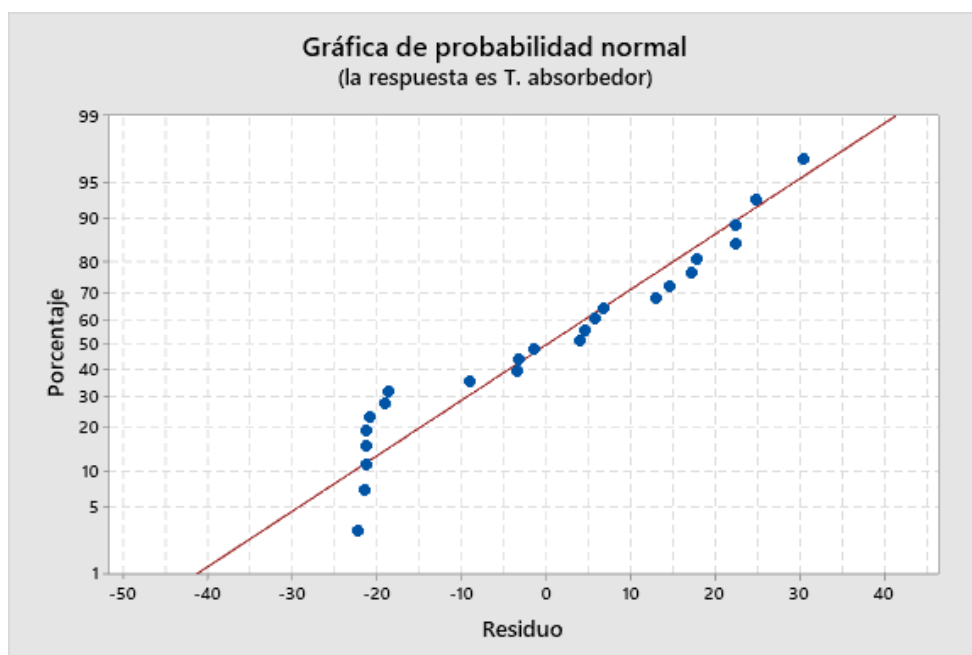


Figura 4.26; Normalidad de los datos

Asimismo fue necesario determinar la homogeneidad de los datos, en base a los residuos de cada factor, es decir, del helióstato, atenuador y el concentrador, tal como se aprecia en las figuras 4.27, 4.28 y 4.29.

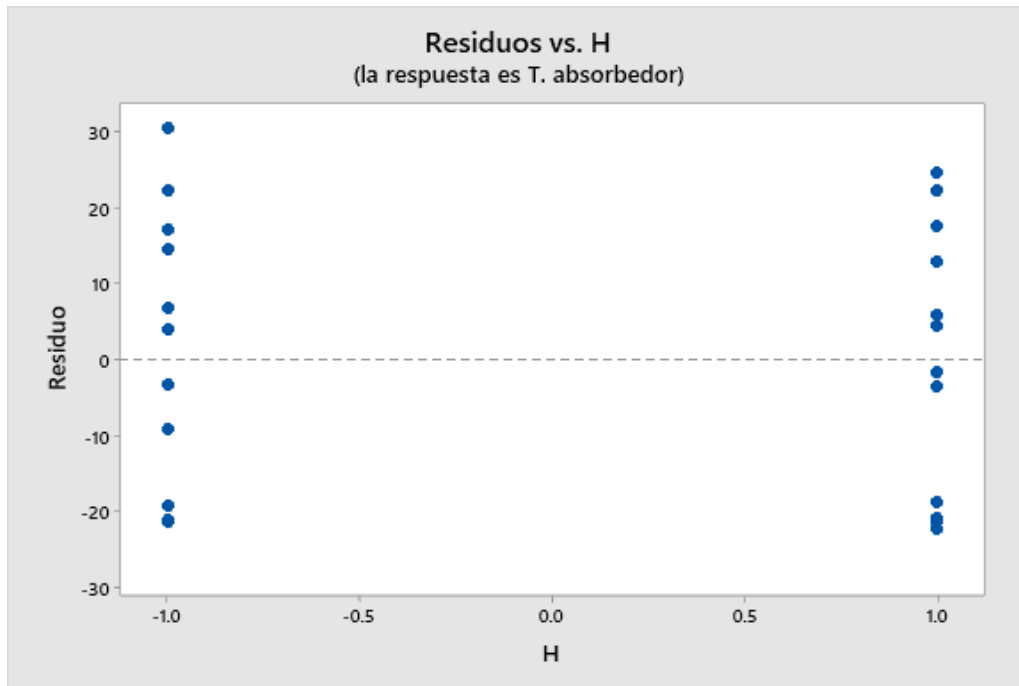


Figura 4.27; Homogeneidad de los datos en base a residuos y el helióstato

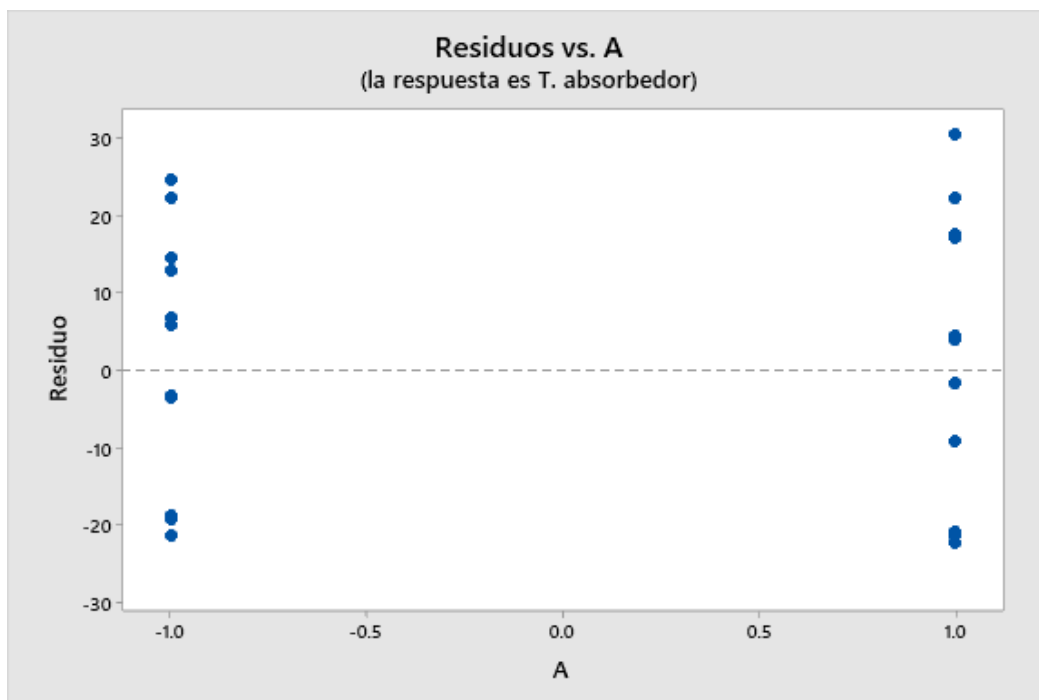


Figura 4.28; Homogeneidad de los datos en base a residuos y el atenuador

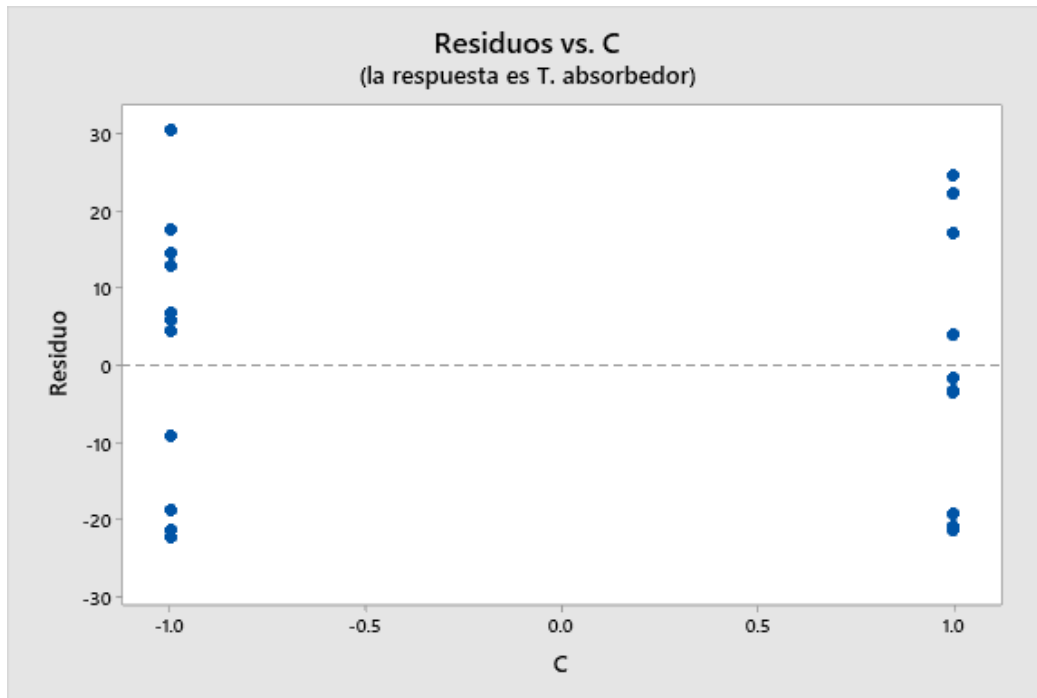


Figura 4.29; Homogeneidad de los datos en base a residuos y el concentrador

Toda vez que los puntos están alineados, tanto al lado derecho e izquierdo, se dice que son homogéneos. Por tanto, se procede a hacer el análisis de varianza. Además los datos deben tener una dispersión absoluta, ver figura 4.30.

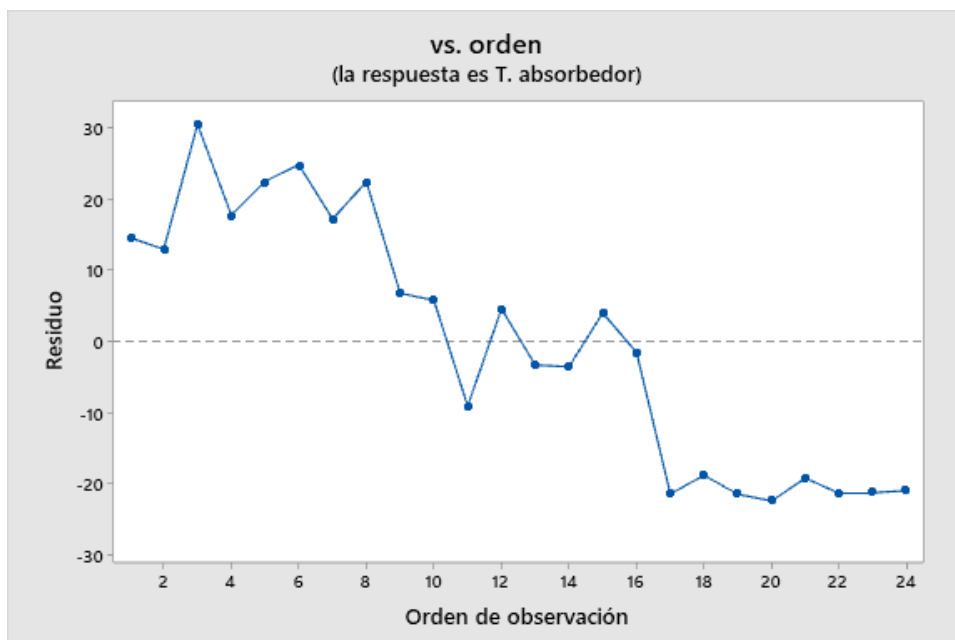


Figura 4.30; Orden de observación

#### 4.7 Análisis de Varianza

La variable respuesta es la energía de alta temperatura, es decir, la temperatura en el absorbedor (Foco del concentrador).

Los factores controlados fueron: Helióstato (H), Atenuador (A) y el concentrador (C); cada uno a dos niveles baja (-) y alta (+).

El modelo matemático planteado para la investigación, se basa al modelo estadístico lineal, es decir, diseño factorial  $2^3$ :

$$T_{ijk} = \mu + h_i + a_j + c_k + (ha)_{ij} + (hc)_{ik} + (ac)_{jk} + (hac)_{ijk} + \varepsilon_{ijk}$$

Donde:

T = es la variable respuesta, es decir, temperatura en el absorbedor ( $^{\circ}\text{C}$ )

$\mu$  = es la media global, es decir, parámetro común a todos los tratamientos.

h = es el efecto del primer factor (Helióstato).

a = es el efecto del segundo factor (Atenuador).

c = es el efecto del tercer factor (concentrador).

$(ha)_{ij}$  = es el efecto de interacción entre el primer y segundo factor

$(hc)_{ik}$  = es el efecto de interacción entre el primer y el tercer factor

$(ac)_{jk}$  = es el efecto de interacción entre el segundo y el tercer factor.

$(hac)_{ijk}$  = es el efecto de interacción de los tres factores.

$\varepsilon_{ijk}$  = es el componente aleatorio de error.

#### 4.8 Prueba de hipótesis

El análisis de varianza nos permite ejecutar la prueba de hipótesis de la investigación, el mismo que engloba a los parámetros meteorológicos, el dimensionamiento de los componentes del sistema solar de incidencia indirecta y la variabilidad de los factores.

La hipótesis específica 1, fue “los parámetros medio ambientales del lugar, como; radiación solar, temperatura, presión atmosférica y la densidad; se determina, a través de las mediciones en estaciones actinométrica y Meteorológica, con pretensión de precisar su factibilidad de uso para el dimensionamiento del sistema colector solar de incidencia indirecta”. El más relevante es la radiación solar global, que es la suma de la directa y difusa, tal es así, se estableció las hipótesis estadísticas como:

Ho: La radiación solar diaria es menor a  $1000 \text{ W/m}^2 \cdot \text{día}$

H1: La radiación solar diaria es mayor a  $1000 \text{ W/m}^2 \cdot \text{día}$

Tabla 4.15: Prueba de hipótesis específica 01.

Estadísticas para una muestra				
	N	Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio
Radiación global (W/m2.día)	12	1370,6633	351,37318	101,43270

Prueba para una muestra						
Valor de prueba = 1000						
	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
					Inferior	Superior
Radiación global (W/m2.día)	3,654	11	,004	370,66333	147,4115	593,9152

Nota: como el nivel de significancia es a dos colas es 0.004, a una sola cola será 0,002, es decir; se rechaza la hipótesis nula debido a que el sig. 0,002 es menor a 0.005, en consecuencia se acepta la hipótesis alterna. Por tanto, la radiación solar diaria es factible para la instalación de tecnologías solares.

La hipótesis específica 2 fue “el dimensionamiento de los componentes del sistema colector solar de incidencia indirecta, se realiza en base a la metodología de diseño VDI 2221, específicamente a la evaluación técnica y económica”, es decir, aquella solución que tiene mayor valor en evaluación técnica y económica es la solución óptima. Por tanto, la hipótesis estadística queda definida:

Ho: La evaluación técnica de la solución III es menor que las soluciones I y II.

H1: La evaluación técnica de la solución III es mayor que las soluciones I y II.

Tabla 4.16: Prueba de hipótesis específica 02 (Evaluación técnica)

Prueba de muestras emparejadas								
Diferencias emparejadas								
	Media	Desv.	Desv. E. prom.	95% de intervalo de confianza de la diferencia		t	gl	Sig. (bilateral)
				Inferior	Superior			
Par 1 S3 - S1	,07	,021	,01	,044	,10	7,379	4	,002
Par 2 S3 - S2	,17	,026	,01	,14	,20	14,910	4	,000

Nota: En ambas comparaciones el nivel de significancia es menor a 0.05, por tanto se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna. Es decir, la

solución III es el más óptimo que las soluciones I y II, respecto a la Evaluación técnica de solución.

El mismo procedimiento se hace para la prueba de hipótesis de la Evaluación económica de solución.

Ho: La evaluación económica de la solución III es menor que las soluciones I y II.

H1: La evaluación económica de la solución III es mayor que las soluciones I y II.

Tabla 4.17: Prueba de hipótesis específica 02 (Evaluación económica)

**Estadísticas de muestras emparejadas**

		Media	N	Desv. Desviación	Desv. Error promedio
Par 1	S3	,7500	5	,01581	,00707
	S1	,6500	5	,02000	,00894
Par 2	S3	,7500 <sup>a</sup>	5	,01581	,00707
	S2	,7000 <sup>a</sup>	5	,01581	,00707

a. La correlación y t no se pueden calcular porque el error estándar de la diferencia es 0.

**Prueba de muestras emparejadas**

		Diferencias emparejadas			95% de confianza de la diferencia		t	gl	Sig. (bilateral)
		Med	Desv. Error	Desv. Error	Inferior	Superior			
Par 1	S3 - S1	,10	,02	,008	,08	,12	12,91	4	,000

La hipótesis específica 3 es “la disposición de los componentes del sistema solar de incidencia indirecta se evalúa, en base a la metodología del diseño factorial  $2^K$ , el mismo que permite estimar los efectos de los factores a dos niveles, luego permite evaluar la generación de energía térmica de alta temperatura”. Para ello se ha utilizado la prueba a través del análisis de varianza, esto implica, disgregar la hipótesis en siete variantes o factores y la prueba se muestra en la tabla 4.18..

La tabla 4.18, muestra fundamentalmente el p-valor de cada hipótesis.

Tabla 4.18: Prueba de hipótesis con análisis de varianza

<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC Ajust.</b>	<b>MC Ajust.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
Modelo	7	11311.3	1615.90	3.56	0.017
Lineal	3	8913.1	2971.02	6.54	0.004
H	1	3599.1	3599.05	7.92	0.012
A	1	1348.5	1348.50	2.97	0.104
C	1	3965.5	3965.51	8.73	0.009
Interacciones de 2 términos	3	1946.7	648.89	1.43	0.271
H*A	1	28.8	28.82	0.06	0.804
H*C	1	0.8	0.77	0.00	0.968
A*C	1	1917.1	1917.09	4.22	0.057
Interacciones de 3 términos	1	451.5	451.53	0.99	0.334
H*A*C	1	451.5	451.53	0.99	0.334
Error	16	7271.1	454.44		
Total	23	18582.3			

Se establecieron siete hipótesis estadísticas, derivados de las hipótesis de la investigación, los mismos que están acompañados con su análisis:

#### **Factor 1**

**Ho** = el ángulo de elevación del helióstato no tiene efecto en la generación de energía térmica de alta temperatura (T. absorbedor)

**Ha** = el ángulo de elevación del helióstato tiene efecto en la generación de energía térmica de alta temperatura (T. absorbedor)

Como el p-valor es 0.012 y es menor a 0.05, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna, es decir, el ángulo de elevación del helióstato tiene efecto en la generación de energía térmica de alta temperatura (T. absorbedor).

#### **Factor 2**

**Ho** = La intervención del atenuador no tiene efecto en la generación de energía térmica de alta temperatura (T. absorbedor)

**Ha** = La intervención del atenuador tiene efecto en la generación de energía térmica de alta temperatura (T. absorbedor)

Como el p-valor es 0.104 y es mayor a 0.05, se acepta la hipótesis nula y se rechaza la hipótesis alterna, es decir, La intervención del atenuador no tiene efecto en la generación de energía térmica de alta temperatura (T. absorbedor).

**Factor 3**

**Ho** = el ángulo de elevación del concentrador de disco no tiene efecto en la generación de energía térmica de alta temperatura (T. absorbedor)

**Ha** = el ángulo de elevación del concentrador de disco tiene efecto en la generación de energía térmica de alta temperatura (T. absorbedor).

Como el p-valor es 0.009 y es menor a 0.05, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna, es decir, el ángulo de elevación del concentrador de disco tiene efecto en la generación de energía térmica de alta temperatura (T. absorbedor)

**Interacción H-A**

**Ho** = La interacción entre el helióstato y el atenuador no tiene efecto en la generación de energía térmica de alta temperatura (T. absorbedor)

**Ha** = La interacción entre el helióstato y el atenuador tienen efecto en la generación de energía térmica de alta temperatura (T. absorbedor)

Como el p-valor es 0.804 y es mayor a 0.05, se acepta la hipótesis nula y se rechaza la hipótesis alterna, es decir, la interacción entre el helióstato y el atenuador no tiene efecto en la generación de energía térmica de alta temperatura (T. absorbedor)

**Interacción H-C**

**Ho** = La interacción entre el helióstato y el concentrador no tiene efecto en la generación de energía térmica de alta temperatura (T. absorbedor)

**Ha** = La interacción entre el helióstato y el concentrador tienen efecto en la generación de energía térmica de alta temperatura (T. absorbedor)

Como el p-valor es 0.968 y es mayor a 0.05, se acepta la hipótesis nula y se rechaza la hipótesis alterna, es decir, la interacción entre el helióstato y el concentrador no tiene efecto en la generación de energía térmica de alta temperatura (T. absorbedor)

**Interacción A-C**

**Ho** = La interacción entre el atenuador y el concentrador no tiene efecto en la generación de energía térmica de alta temperatura (T. absorbedor)

**Ha** = La interacción entre el atenuador y el concentrador tienen efecto en la generación de energía térmica de alta temperatura (T. absorbedor)

Como el p-valor es 0.057 y es mayor a 0.05, se acepta la hipótesis nula y se rechaza la hipótesis alterna, es decir, La interacción entre el atenuador y el concentrador no tiene efecto en la generación de energía térmica de alta temperatura (T. absorbedor)

### Interacción H-A-C

**H<sub>0</sub>** = La interacción entre el helióstato, atenuador y concentrador no tiene efecto en la generación de energía térmica de alta temperatura (T. absorbedor)

**H<sub>a</sub>** = La interacción entre el helióstato, atenuador y concentrador tienen efecto en la generación de energía térmica de alta temperatura (T. absorbedor)

Como el p-valor es 0.334 y es mayor a 0.05, se acepta la hipótesis nula y se rechaza la hipótesis alterna, es decir, la interacción entre el helióstato, atenuador y concentrador no tiene efecto en la generación de energía térmica de alta temperatura (T. absorbedor)

La figura 4.31, corrobora a la tabla ANOVA, la significancia de los factores helióstato y concentrador.

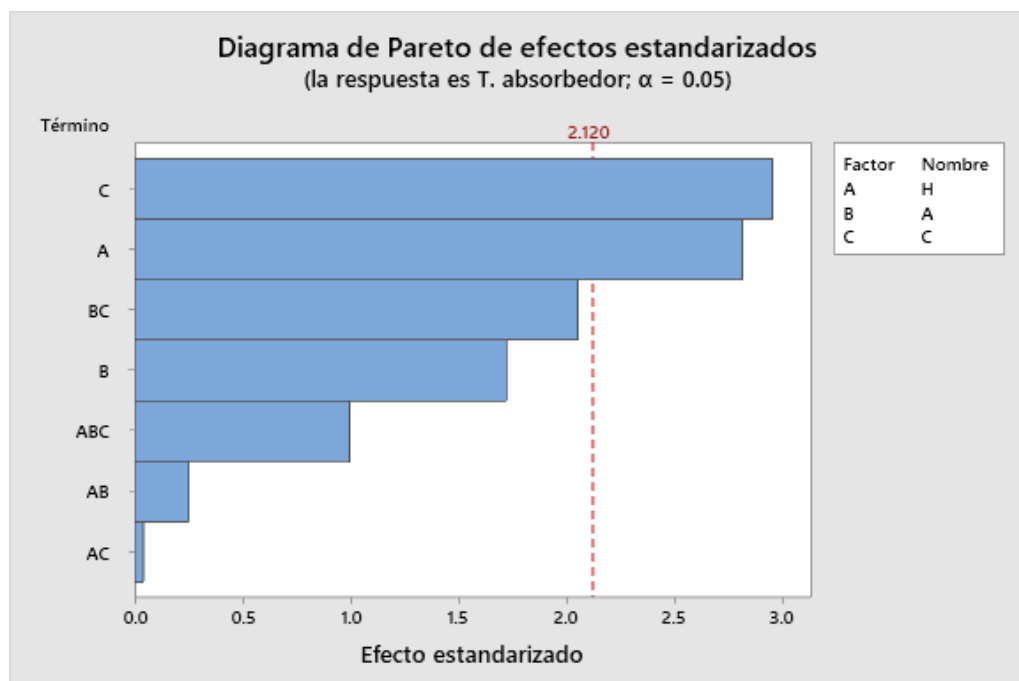


Figura 4.31; Diagrama de Pareto de efectos estandarizados.

En la figura anterior se muestra que los factores más significativos son el concentrador parabólico y el helióstato, independientemente, debido a que tienen efecto sobre la energía térmica de alta temperatura. Sin embargo, los otros componentes también tienen efecto pero en menor orden.

La figura 4.32, muestra el efecto del helióstato, atenuador y el concentrador en la temperatura del absorbedor, de manera independiente y tienen una tendencia negativa.

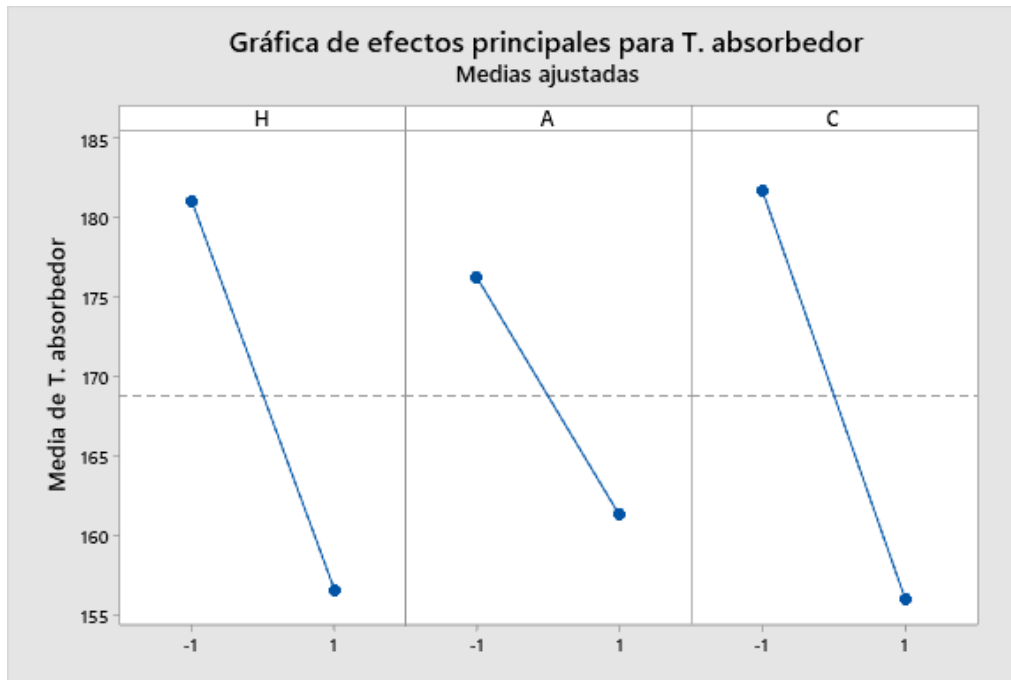


Figura 4.32; Efectos principales

En la figura 4.33 se muestra que ninguna de las interacciones no tienen efecto significativo en la temperatura del absorbedor, debido a que ninguna de las líneas se cruzan, siempre están separadas.

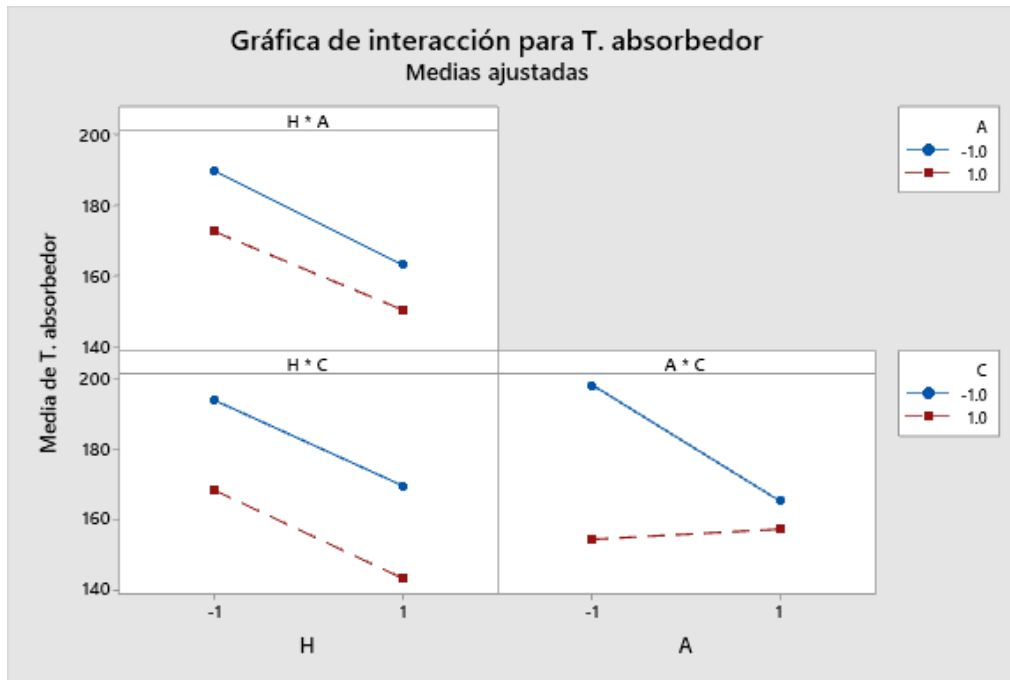


Figura 4.33; Efectos de la interacción.

En la figura 4.34 podemos visualizar los efectos estandarizados significativos y no significativos, esto se distingue cuando los puntos están muy cerca o alejados a la línea diagonal. En este caso los más significativos son el helióstato y el concentrador

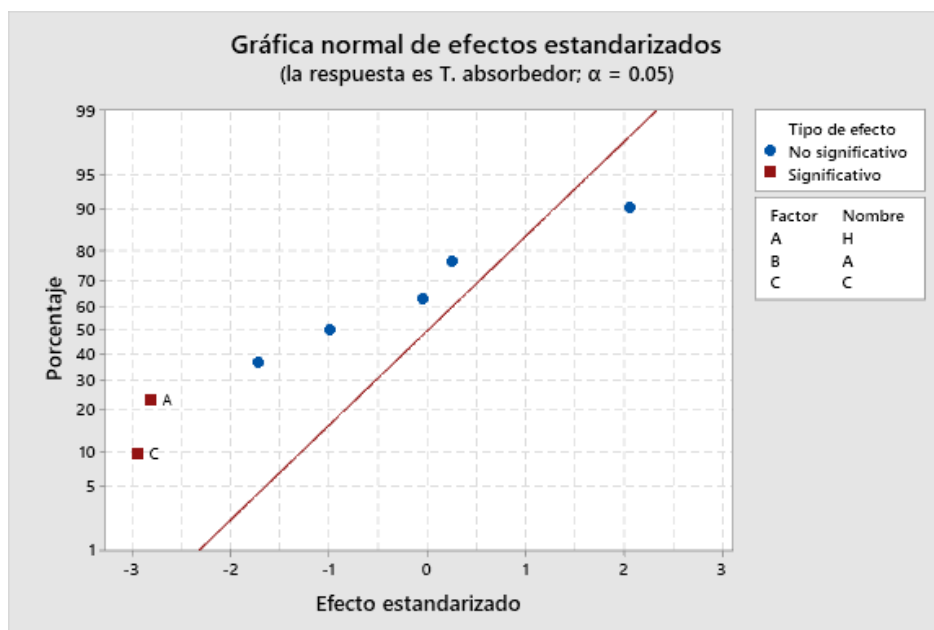


Figura 4.34; Efectos estandarizados significativos y no significativos

La hipótesis principal aborda la generación de energía térmica de alta temperatura, es decir, superior a los 200 °C, en base a una combinación de factores, esto se muestra en la figura 4.35.

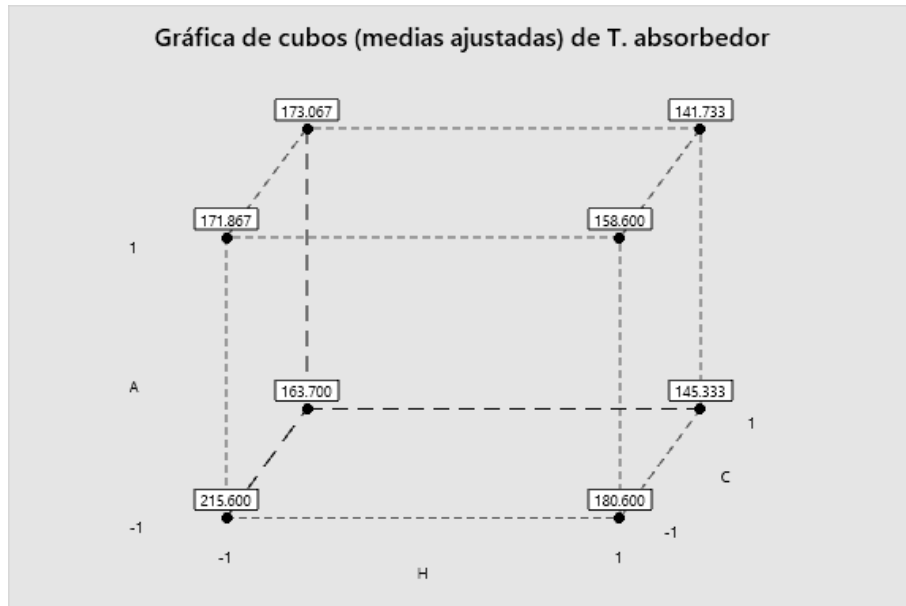


Figura 4.35; Efectos estandarizados significativos y no significativos

La máxima temperatura en el absorbedor es 215.6°C, esto se logra con la combinación; helióstato con nivel bajo, concentrador nivel bajo y atenuador también con nivel bajo. Esta optimización ha permitido la generación de alta temperatura en el sistema solar de incidencia indirecta.

Esta optimización es corroborada por la figura 4.36

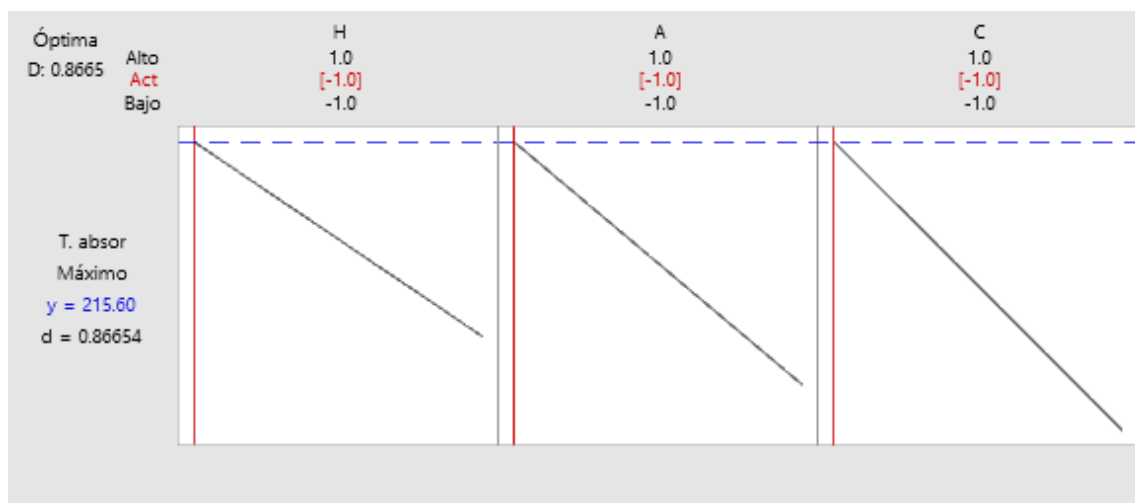


Figura 4.36; Diagrama de optimización

Finalmente se presenta el modelo de la investigación, donde su variación es 21.32, y R cuadrado de 60.87%, R cuadrado ajustado 43,75% y el R cuadrado de predicción 11.96%. Ver tabla 4.19

Tabla 4.19: Resumen del modelo

<b>S</b>	<b>R-cuad.</b>	<b>R-cuad. (ajustado)</b>	<b>R-cuad. (pred)</b>
21.3176	60.87%	43.75%	11.96%

La ecuación de regresión en unidades no codificadas es:

$$T. \text{ absorbedor} = 168.81 - 12.25 H - 7.50 A - 12.85 C + 1.10 H*A - 0.18 H*C + 8.94 A*C - 4.34 H*A*C$$

#### **4.9 Análisis e interpretación de los resultados.**

Los parámetros medioambientales en el Perú son variables, en particular en zonas alto andinas, tal es así, la investigación se ha realizado en la provincia de Huancayo, específicamente en la Universidad Nacional del Centro del Perú, donde los instrumentos están instaladas a una altura de 3314 m.s.n.m., latitud de 12°3'54.5" S y longitud Oeste 75°12'17.5" O. Los principales parámetros ambientales que fueron medidos son: la radiación directa, radiación difusa y la temperatura del ambiente. Tal es así, la figura 4.2, muestra la radiación directa de un periodo de un año (julio-2018 a junio-2019); en cada mes se muestra el promedio diario de radiación en W/m<sup>2</sup> y su variación. Los rayos solares por lo general impregnan al lugar a las siete horas y cesa a las 17 horas, su comportamiento es variable según estación del año, tal es así, en los meses de diciembre a marzo la radiación es bajo y su desviación estándar es elevada, debido a la presencia significativa de las nubes; además se considera como pico solar al intervalo de 9 a 15 horas, es decir 6 horas diarias.

La figura 4.3, muestra el promedio horario mensual de la radiación difusa de 12 meses, al igual que la directa su pico solar es de 6 horas, su presencia más baja se ve en los meses de mayo, junio y julio; su variación también es significativo. Por teoría se sabe que la radiación global es la suma de las dos radiaciones directa y difusa, en consecuencia, la radiación mínima que es aproximadamente de 314 w/m<sup>2</sup>, es suficiente para implantar tecnologías solares térmicas en el Valle del Mantaro.

La caracterización del comportamiento de la radiación directa y difusa durante el mes de junio, muestra la figura 4.4; todos los meses posee la misma configuración, es más, el modelo matemático se ajusta al sexto orden.

Es característico presentar los datos de radiación en forma anual, esto lo hace la NASA, SENAMI y en la región el Instituto Geofísico de Huayao-Huancayo, en consecuencia, también se presenta el resumen de los datos por mes de un periodo anual, esto se muestra en la tabla 4.1.

Otro de los parámetros meteorológicos más importantes para el diseño de tecnologías solares es la temperatura del medio, tal es así, se presenta el resultado en la figura 4.5 donde el promedio anual es 14.3 °C, la mínima -0.6°C y la máxima 34 °C. Para la configuración del sistema se ha tomado en cuenta el promedio anual. Asimismo se tiene la humedad y velocidad del aire como referencia en las figuras 4.7 y 4.8, respectivamente.

Para el dimensionamiento del sistema solar de incidencia indirecta, se tuvo como referencia al horno para la fabricación del concentrador parabólico de disco, es así, en la región solo se puede plegar el espejo hasta un diámetro máximo de 1.2 m, partiendo de ello, se establece las necesidades para el diseño tal como se ve en la tabla 4.2. De esta se jerarquiza los componentes principales tales como: el buen dimensionamiento del heliostato, la estructura y el concentrador, sobre todo este último debe ser preciso y construido de un espejo cóncavo continuo.

La tabla 4.3 muestra los requerimientos para el dimensionamiento relacionado a la forma geométrica, a la cinemática, fuerza (carga), tipo de material, fabricación, montaje, seguridad, etc. A fin de que éstas sean plasmadas en la construcción del módulo.

La matriz morfológica del sistema solar de incidencia indirecta, es una metodología de diseño VDI 2221 que permite tomar decisiones en base a las funciones o atributos, las diferentes alternativas de solución, es así, la tabla 4.5 muestra tres alternativas para cada función y su vez, estas generan tres alternativas de solución. La evaluación se hizo en base al ratio de criterios técnicos y el ratio de criterios económicos, en ambos casos el que se impuso fue la alternativa III, tal como muestran las tablas 4.6 y 4.7. A esto se suma la figura 4.10, donde la alternativa III es que se aproxima más a la línea diagonal de la

metodología. En consecuencia, dicha alternativa fue constituida por los componentes que se ilustra en la figura 4.10 y el detalle se muestra en anexo 01.

Para la configuración definitiva de los componentes del sistema se tomados en cuenta los ángulos de elevación de solsticio y equinoccio en el Valle del Mantaro (figura 4.11), esto indica, que la disposición del heliostato no siempre va a estar dirigido hacia el norte, sino también hacia el sur. Las características geométricas y técnicas muestran la tabla 4.8 y la figura 4.12 y esto es ampliado en el anexo 02. La figura 4.13, muestra al atenuador cuya función es controlar el flujo de radiación emitida por el heliostato hacia el concentrador, el dimensionamiento detallado se puede ver en anexo 03.

Una de las particularidades de la investigación es que se toma la parte central de la parábola para la construcción del disco, tal como se aprecia en la figura 4.14, 4.15 y el anexo 04; además, el propósito fue construir el disco de manera continua, es decir, sin trozar el espejo, en base a los parámetros que detalla la tabla 4.9, figura 4.16 y anexo 05. La figura 4.17, muestra la estructura del receptor, el mismo que se ubica en el foco del concentrador, sobre este se ubica el absorbedor construido de un material de conductividad térmica alta, en este caso el cobre, los detalles se muestran en el anexo 06.

Las figuras 4.18, 4.19, 4.20 y 4.21 muestran el módulo del sistema solar de incidencia indirecta y la figura 4.22 el montaje de todos los componentes.

En la tabla 4.10, se definen los factores y sus respectivos niveles, es así, el factor heliostato se varía en dos niveles, nivel bajo (-) a  $40^\circ$  de ángulo de elevación y nivel alto (+) a un ángulo de elevación de  $50^\circ$ , el factor atenuador también se varía a dos niveles; nivel bajo (-) sin atenuador y nivel alto (+) con atenuador, luego el factor concentrador se varía también a dos niveles, bajo (-) con ángulo de eje focal a  $0^\circ$  y alto (+) con ángulo de eje focal a  $13^\circ$ ; todo esto se corrobora con la tabla 4.11 que corresponde a la matriz de diseño factorial. Los valores -1 y +1, también corresponden a los niveles bajo y alto, respectivamente, esto con fines de alimentar datos al software Minitab 19.

La tabla 4.12 muestra la estimación de interacciones, es decir, el efecto que tiene cada factor y las interacciones a la variable respuesta, facilitándonos la definición de relaciones para la determinación del efecto. La figura 4.23 muestra

la representación geométrica del diseño factorial  $2^3$  que es propio de la investigación.

Para la recolección de datos se tuvo en cuenta ocho combinaciones, tal como exige el diseño factorial  $2^3$ , como son a tres réplicas, se tiene 24 tratamientos; todo esto se muestra en la tabla 4.13. Asimismo es importante explicar por ejemplo la combinación 1: H40 – S/A – C 0° (- - -), todos están a nivel bajo, es decir, el helióstato con un ángulo de elevación a 40°, sin atenuador y con el concentrador con eje focal a 0°; adicional a esto se ha controlado la temperatura ambiental, la radiación global en  $W/m^2$ , la radiación que emite el helióstato, la radiación que emite el concentrador hacia el absorbedor (foco), la temperatura al contorno del absorbedor y la Temperatura en el mismo absorbedor. Estas mediciones se hicieron en las ocho combinaciones cada una a tres réplicas.

En realidad lo que interesa es la variable respuesta, es decir, la energía térmica de alta temperatura (Temperatura en el absorbedor), los mismos que están definidas en la tabla 4.14; con estos datos se acudió a realizar el análisis estadístico mediante el software Minitab 19.

Antes de realizar el análisis con ANOVA, se determinó la normalidad y la homogeneidad de los datos, los mismos que denotan esa exigencia. La figura 4.25 representa la normalidad toda vez que los datos están muy próximos a la línea diagonal, del mismo modo se demuestra que los datos de los tres factores tienen homogeneidad, esto se aprecia en las figuras 4.26, 4.27 y 4.28, ahí se puede ver que los datos están alineadas al lado derecho e izquierdo, es decir a los niveles -1 y +1; esta alineación indica la homogeneidad de datos de cada factor.

En la figura 4.29 se representa la dispersión absoluta de los datos, es decir la relación de los residuos respecto al orden de observación. Verificado las exigencias para la prueba ANOVA, se procedió con el proceso de la prueba de hipótesis cuyo resultado se aprecia en la tabla 4.15, donde verificamos el p-valor o la significancia de cada factor, interacciones de dos términos e interacciones de tres términos que tienen sus efectos sobre la variable respuesta. En consecuencia se puede establecer que los factores que si tienen efecto significativo en la generación de energía térmica de alta temperatura son los factores que están relacionados con el helióstato y el concentrador toda vez que su p-valor es 0.012 y 0.009, respectivamente; que son menores a 0.05, por tanto

con este indicador se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna. La figura 4.30 que representa al diagrama de Pareto de efectos estandarizados, también corrobora al efecto significativo de los factores Concentrador (C) y helióstato (H), toda vez que sobre pasa la línea vertical roja, mientras que el atenuador, las interacciones de dos y tres incógnitas tienen efectos pero no significativos. La figura 4.31 muestra el efecto negativo que tienen los factores H, A, C hacia a variable respuesta, es decir, que la temperatura en el absorbedor es mayor cuando los factores están en su nivel bajo. La figura 4.32 muestra que ninguna interacción de dos incógnitas tienen efecto sobre la variable respuesta, esto se nota cuando no hay cruce o intersección de las líneas de los niveles. La hipótesis principal fue demostrar que la configuración del sistema solar de incidencia indirecta puede generar energía térmica de alta temperatura, esto es comprobada a través de la figura 4.34, donde la mejor combinación para obtener alta temperatura es cuando los tres factores están a nivel bajo, esto quiere decir; el helióstato con un ángulo de elevación de  $40^\circ$ , sin atenuador y el concentrador con eje focal  $0^\circ$ . En el experimento es la única combinación que satisface la generación de alta temperatura, esta hipótesis se corrobora con la figura 4.35 que corresponde a la optimización.

#### **4.10 Discusión de los resultados**

En la investigación Análisis estadístico de superficies reflectantes no ideales a efectos de conocer la distribución espacial de la energía solar reflejada, se muestra el procedimiento para el análisis de la calidad superficial y seguimiento de dispositivos reflectantes, donde encontraron problemas de aplicabilidad en caracterizar la energía y su distribución en el receptor (Avellaner, 1999); en caso nuestro, a pesar de ser incidencia indirecta, la distribución de rayos solares en el receptor fue lo adecuado, es decir había concentración de radiación; sin embargo, en el recorrido del flujo de rayos desde el helióstato-concentrador y receptor hubo pérdidas, tal como muestra la tabla 4.13.

La investigación Caracterización óptica y térmica del Horno solar del IER, muestra diversos parámetros como; error óptico global, el pico máximo de concentración solar y la potencia del horno; utilizando un calorímetro de cavidad, luego demuestra que es posible fundir diversos materiales en el

foco del concentrador (Pérez, 2015). En el estudio nuestro, no se ha fundido ningún material, sin embargo se ha evaluado la temperatura en el absorbedor o receptor, variando tres factores, cada una a dos niveles, obviamente cada combinación arrojó resultados diferentes, siendo el más óptimo el helióstato, atenuador y concentrador en nivel bajo (- - -), que alcanza una temperatura de 215.6°C.

La tesis doctoral Horno solar de alta temperatura para el cocimiento de Tabiques de arcilla, presenta como resultado la cocción de 10 tabiques de arcilla a temperaturas de 700, 800, 900, 1000 y 1100 °C; utilizando un helióstato de 9 m<sup>2</sup> con seguidor solar, concentrador parabólico fuera de eje, con diámetro de apertura 1.58 m, foco de 1m y diámetro del receptor 0.25m (Villeda Muñoz, 2010); mientras que en el estudio en curso se ha logrado temperaturas desde 142°C a 215°C, con un helióstato de 1.69 m<sup>2</sup>, concentrador de 1.2 m de diámetro de apertura, distancia focal de 1m y 0.2m de diámetro del receptor. La diferencia es significativo, esto se debe a que el tamaño del helióstato es importante.

Por su parte Fernández (2011), diseña un prototipo de laboratorio del “sistema de lucernario mediante un CPC prismático hueco con alta eficiencia y reducido deslumbramiento, en ello se ha experimentado que la eficiencia medio de mejora fue en un 300% en el rango de 0 a 85°, con el sistema completo es posible iluminar, con una uniformidad controlada, un área de 40 m<sup>2</sup> con un nivel medio de 400 Lux”. En particular, el estudio nuestro no ha sido conducido para la iluminación, sin embargo es materia de comparación la metodología de diseño del prototipo o módulo, que fue con VDI 2221.

Existen diseños de alambiques solares que utilizan concentración, evaporación porosa, condensación interna y circulación termosifónica en el que se ha simulado un modelo matemático de estado estacionario del alambique y muestra que la disminución de la velocidad del viento y la temperatura del condensador aumenta la eficiencia del alambique y las tasas de destilación, por otro lado, el aumento de la intensidad solar aumenta la tasa de destilación; pero la eficiencia no aumenta para todo el rango de intensidad (Al-Nimr y Dahdolan, 2015). En el desarrollo de la tesis, también se establece el modelo matemático producto del diseño

experimental, además se demuestra que la intensidad solar también influye significativamente en la generación de energía térmica de alta temperatura.

En el estudio Diseño óptico de un sistema solar de concentración de Fresnel para la transmisión directa de radiación a través de un paquete de fibra óptica, se muestra la pérdida de transmisión en aproximadamente 60 %, debido a que el alto nivel de radiación concentrada golpea los espacios entre las fibras ópticas individuales (Rohou, Mojiri, Rosengarten y Andrews, 2015). Las pérdidas es inevitable, en el estudio en curso también se presentó este fenómeno; por ejemplo, cuando la radiación directa que llega al helióstato fue de  $1090 \text{ W/m}^2$ , de éste sale una radiación de  $623 \text{ W/m}^2$ , mientras el concentrador emite  $495 \text{ W/m}^2$ , es decir, hay una pérdida de 43% en el helióstato y 55% en el concentrador. El artículo Colector cilindro-parabólico o colectores Fresnel lineal una comparación de características ópticas, incluida la calidad térmica basada en soluciones comerciales, muestra “que la eficiencia es ligeramente superior con la orientación NS, pero las diferencias entre ambas orientaciones son menores que para los PTC” (Abbas, Montes, Rovira y Martínez, 2015); además, hay que tener en cuenta que la “configuración LFC simulada está diseñada para orientación NS, ya que el campo solar es simétrico con el receptor, por otro lado; las realizaciones EW conducen a intensidades de flujo muy altas en la culminación del sol todos los días del año, pero con valores bajos durante la mañana y la tarde” (Abbas, Montes, Rovira y Martínez, 2015). Efectivamente la orientación del sistema es clave, en el Valle del Mantaro, los sistemas solares no todo el tiempo tiene que estar orientadas hacia el norte, en los meses de diciembre, enero y febrero deben estar orientados hacia el sur; esto es imprescindible considerar para la instalación de tecnologías solares.

En un estudio se diseñó un disco parabólico con un diámetro no mayor a 1 m, la longitud máxima del eje focal en un rango de  $0.5 \text{ m} < f < 2 \text{ m}$ , se eligió  $f = 65 \text{ cm}$  con lo cual se genera sobre el plano focal una imagen de amplitud  $W = 25 \text{ cm}$ , diámetro de disco  $a = 100 \text{ cm}$  y ángulo de borde  $\varphi = 45^\circ$ , logra obtener energía absorbida de 1.22 MJ” (Pino, Ernesto, G, A, & Florencio, 2011); en comparación a ello, en el estudio se ha logrado una

temperatura en el absorbedor desde 142°C a 215°C, con un concentrador de 1.2 m, distancia focal 1 m y diámetro del receptor 0.2m.

Un colector de tipo estacionario consigue una baja concentración, “obteniendo una menor captación de radiación directa en el colector, el proceso de truncamiento influye de dos maneras; primero disminuye de manera considerable la concentración del colector y es de 2.46 cuando el semi ángulo de aceptación es de 24°”(Echevarría, 2011), y luego es de 1.56 después del proceso de truncamiento, en segundo lugar “el proceso de truncamiento beneficia ligeramente a la concentración, ya que permite al colector, la captación de mayor radiación difusa, pero el beneficio es casi imperceptible para este caso” (Echevarría, 2011). Efectivamente, un sistema estático tiene limitaciones en la captación de la radiación solar, sobre todo cuando el sistema es indirecto, para garantizar un flujo continuo desde el helióstato al concentrador durante un intervalo de tiempo considerable es necesario que el tamaño del helióstato se sobredimensionado por menos en un 100% respecto al concentrador.

Otro aspecto importante es el sistema de almacenamiento de calor, esto en el receptor, por ejemplo, en el proceso de evaporación/condensación y agregar las aletas a los tubos conduce a un aumento del triple en el calor almacenado en el PCM durante el proceso de carga, durante la descarga, se obtuvo un aumento del 79% en la energía descargada en comparación con el tubo de calor desnudo después de 3 h (Almsater, Saman y Bruno, 2015); en realidad el tema de almacenamiento de energía es un problema latente, requiere de especial atención para garantizar la sostenibilidad en la producción de energía térmica o eléctrica, en el estudio no se ha contemplado este aspecto, solo se ha comprobado la posibilidad de generación de energía térmica de alta temperatura.

La forma adecuada de demostrar la eficiencia de energía solar concentrada, es el diseño de dispositivos que tuestan granos de cacao con energía solar concentrada, la investigación demostró que se llegó a tostar 3kg en aproximadamente 30 minutos (sin contar el tiempo de precalentamiento), así como también 6kg en aproximadamente una hora, el tostador cumple con la condición de funcionar con energía solar, ya que

tanto el tostado, como el mecanismo de mezclado funcionan con esta forma de energía (Escalante, 2015). La generación de energía térmica en sistema de concentración puede accionar diversas tecnologías industriales como secadores, generador de energía eléctrica, tostadores, hornos, etc.; pero esto exige alta temperatura, sin embargo ya se ha demostrado la posibilidad de generar energía térmica bajo estas exigencias.

## CONCLUSIONES

- Los datos actinométricos y meteorológicos fueron evaluados en un periodo de un año, tal es así, la radiación directa promedio mensual que se utilizó para la configuración fue de  $314 \text{ W/m}^2$ , en un día con 6 horas pico la radiación fue  $1884 \text{ W/m}^2 \times \text{día}$  que corresponde al mes de enero, sin embargo la radiación promedio anual es de  $1370 \text{ W/m}^2 \times \text{día}$  que es superior a  $1000 \text{ W/m}^2$ , esto implica que las condiciones para la instalación de la tecnología es factible. La temperatura ambiental varía de  $-0.6^\circ\text{C}$  a  $34^\circ\text{C}$  y el promedio anual es de  $14.3^\circ\text{C}$ , dato que se utilizó para el dimensionamiento de los dispositivos.
- El dimensionamiento de los componentes del sistema se hizo bajo la metodología VDI 2221, específicamente en base a la evaluación técnica y económica, cuyo ratio es 0,8 y 0,75 respectivamente. Estos corresponden a la solución III, por tanto, resultó ser el más óptimo, en ello, la necesidad prioritaria fue el helióstato, concentrador, atenuador y el absorbedor, cuyo requerimiento geométrico fue:  $1300\text{mm} \times 1300 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$  para el helióstato, diámetro del plato  $1200 \text{ mm}$ , distancia focal  $1000 \text{ mm}$  y espesor del cristal  $6 \text{ mm}$  para el concentrador; sobre todo este último tiene relevancia debido a que su construcción fue en cristal continuo, es decir, sin seccionamiento. El atenuador  $1500 \text{ mm} \times 1300 \text{ mm}$  y el receptor con una altura variable desde  $600 \text{ mm}$  a  $900 \text{ mm}$ .
- Los factores para el diseño factorial  $2^3$  fueron; el ángulo de elevación del helióstato a  $40^\circ$  en el nivel bajo y  $50^\circ$  en el nivel alto, respecto al factor atenuador se ha considerado, sin atenuador nivel bajo y con atenuador nivel alto; en el factor concentrador se ha tomado en cuenta el ángulo de elevación  $0^\circ$  (en el eje focal) nivel bajo y  $13^\circ$  grados del eje focal nivel alto.

Durante el proceso de medición la temperatura ambiental fue de 23.6 °C, la radiación directa promedio de 1003.8 W/m<sup>2</sup>, la radiación reflejada por el helióstato 685.9 W/m<sup>2</sup> y la radiación emitida por el concentrador hacia el foco o absorbedor 427 W/m<sup>2</sup>, es decir, hubo pérdidas ópticas en la reflexión de rayos solares, estos datos fueron obtenidos en el intervalo de 10 horas a 15 horas.

- La combinación óptima de los factores con sus niveles fue; Helióstato con ángulo de elevación a 40° (nivel bajo), sin atenuador (nivel bajo) y concentrador con ángulo de elevación 0°(nivel bajo), los mismos que otorgaron una temperatura media de 215.6°C, mientras que la combinación de: heliostato, atenuador y concentrador todos a nivel alto generaron un temperatura media de 141.7 °C. El modelo tiene una desviación estándar de 21.3°C y está representado por:

$$T. \text{ absorbedor} = 168.81 - 12.25 H - 7.50 A - 12.85 C + 1.10 H*A - 0.18 H*C + 8.94 A*C - 4.34 H*A*C.$$

## RECOMENDACIONES

- La implementación de tecnologías solares térmicas, requieren de una evaluación de parámetros actinométricos y meteorológicos, por lo que es recomendable hacer las mediciones con instrumentos de precisión en el lugar donde se va a instalar la tecnología.
- Para el dimensionamiento de los componentes de una tecnología solar, es recomendable utilizar metodologías de diseño como el VDI 2221 y 2225, debido a que exigen alternativas de solución y permite tomar decisiones apropiadas en la parte técnica y económica.
- Cuando se va a realizar investigaciones de tipo aplicada, en particular de nivel experimental, es recomendable acudir a diseños experimentales específicamente a diseños factoriales 2k, debido a su bondad de optimización y grado de influencia de los factores hacia la variable respuesta.
- Para obtener mejores resultados es necesario identificar horas pico-solar y en este intervalo recabar los datos, además, es necesario que el área del helióstato sea sobredimensionado respecto al área del concentrador

en al menos 100%, a fin de garantizar la huella de la radiación en toda la superficie del concentrador.

- Antes de realizar el análisis de varianza, se recomienda realizar la prueba de normalidad y homogeneidad de los datos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbas R., Montes M.J., Rovira A.y Martínez J.M.(2015). *Parabolic trough collector or linear Fresnel collector? A comparison of optical features including thermal quality based on commercial solutions*. Solar Energy. Madrid-España:Elsevier. [www.elsevier.com/locate/solener](http://www.elsevier.com/locate/solener).
- Almada M., Cáceres M. S., Singer M. M. y Pulfer J.C. (2005). *Guía de uso de cocinas y Hornos solares*. Asunción Paraguay: Fundación Celestina Pérez de Almada. Recuperado de <http://unesdoc.unesco.org/images/0015/001562/156205s.pdf>.
- Almsater S., Saman W. y Bruno F. (2015). *Performance enhancement of high temperature latent heat thermal storage systems using heat pipes with and without fins for concentrating solar thermal power plants*. Renewable Energy 89 (2016) 36-50.
- Al-Nimr, M.A. y Dahdolan M.E. (2015). *Modeling of a novel concentrated solar still enhanced with a porous evaporator and an internal condenser*. Solar Energy 114. Jordan:Elsevier. [www.elsevier.com/locate/solener](http://www.elsevier.com/locate/solener)
- Avellaner Lacal, J. (1999). *Análisis estadístico de superficies reflectantes, no ideales, a efectos de conocer la distribución espacial de la energía solar reflejada*. Paris-España: Universidad Politécnica de Madrid.
- Barriga Gamarra, B. (2016). *Métodos de Diseño en Ingeniería Mecánica* (Pontificia Universidad Católica del Perú, ed.). Retrieved from <https://pdfcoffee.com/qdownload/metodos-de-diseo-en-ing-mecanica-introduccion-benjamin-barriga-pucp-4-pdf-free.html>
- Bauerle Concha, I. A. (2018). *Diseño conceptual de un horno solar de alta temperatura, mediante segmento de paraboloide móvil, con receptor fijo de pequeña escala*. (Universidad de Chile). Retrieved from <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/167860/Diseño-conceptual->

de-un-horno-solar-de-alta-temperatura-mediante-segmento-de-paraboloide-móvil-con-receptor.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Benito, T. P. (2006). *Guía del Instalador de Energías renovables; Energía Fotovoltaica, Energía Térmica, Energía eólica*. México: Limusa.
- Box, G.E., Hunter J. S. y Hunter W.G. (2011). *Estadística para investigadores. Diseño, Innovación y descubrimiento*. Segunda edición. Barcelona:Edictorial Reverté.
- Brenes A. y Saborío V. F. (1995). *Elementos de climatología su aplicació didáctica a Costa Rica*. Serie Geográfica N° 1. Costa Rica: Editorial universidad estatal a distancia.
- Cabrera J.A., Cuesta J., Pérez Martínez M. y Núñez Crespí S. (2008). *Energía solar Termoeléctrica*. España: Prospectiva y vigilancia tecnológica. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/126077147/energia-solar-termoelectrica-ciemat-pdf>.
- Clemente De la Cruz, W., & Alcántara Boza, A. (2020). Caracterización de radiación solar directa y difusa en condiciones climáticas del Valle del Mantaro. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 23(46), 87–94. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v23i46.18029>
- COES SINAC. (2016). *Informe de Operación anual del SEIN*. Perú: Dirección ejecutiva-Sub dirección de Gestión de Información. Recuperado de <file:///C:/Users/USUARIO/Downloads/InfOperacionAnual%202016.pdf>.
- COP 21. (2016), *El acuerdo de París, el largo proceso hacia el éxito Rol, Retos y oportunidades para el Perú*. Lima - Perú:Ministerio del ambiente. Recuperado de <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2016/03/COP21-Final.pdf>.
- Dumitrescu L., Quesada Estrada A.M., Pérez Rodriguez R., Hernández Gonzales L. W. (2010). *Experiencias en la selección de aceros asistida por computadoras en la carrera de ingeniería mecánica*. Cuba: Ciencias Holguín. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/1815/181517919018.pdf>.
- Duffie, J., & Beckman, W. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*. In Wiley (Ed.), John Wiley (Fourth Edi). [https://doi.org/10.1016/s0272-2712\(18\)30627-9](https://doi.org/10.1016/s0272-2712(18)30627-9)

- Durán Medina P., Enciso Contreras E., Barbosa Saldaña J.G., Jiménez Bernal J.A. y Sánchez Silva F. (2011). *Diseño de disco colector solar de pequeña modularidad*. Memorias del XVII Congreso Internacional anual de la SOMIM. San Luis de Potosí, México. A1-106.
- Echavarría López, C.A. (2011). *Diseño de un colector cilíndrico parabólico compuesto con aplicación para el calentamiento de agua*. (Tesis de pre grado). Universidad de Piura, Perú.
- Escalante Delgado, F. (2015). *Desarrollo de un prototipo de tostador de granos de cacao de 6 kg/hora que funcione con energía solar concentrada*. (Tesis de pre grado). Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Espinoza Montes, C. (2014). *Metodología de investigación tecnológica*. Pensando en sistemas (Segunda ed.). Huancayo, Perú: Soluciones Gráficas SAC.
- Espinoza, C. A. (2013). *Design methods in mechanical engineering*. Retrieved from <http://hdl.handle.net/20.500.12894/6811>
- Espinoza, C., Clemente, W., & Martinez, C. (2020). Meteorological variability and use of solar energy in the Mantaro Valley, Peru. *International Journal of Renewable Energy Research*, 10(3), 1307–1315. Retrieved from <https://www.ijrer.org/ijrer/index.php/ijrer/article/view/11274/pdf>
- Fernández Balbuena, A.A. (2011). *Sistemas ópticos para concentración, captación y guiado de radiación solar*. Madrid: Universidad Complutense de Madrid.
- Francois Rozis, J., & Guinebault, A. (1997). *Calefacción solar para regiones frías : guía tecnológica de aplicación para la vivienda y la agricultura en países en desarrollo*. Lima, Perú: ITDG.
- Franco J., Saravia L., Cadena C., y Fernández C (2003). *Concentrador solar parabólico para fundir latas de aluminio, construcción y primeros ensayos*. Argentina: ASADES (Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente). Recuperado de <https://es.scribd.com/document/326642948/Franco-y-Otros-2003-Concentrador-Solar-Parabolico-Para-Fundir-Al-Ejemplo>.
- Física Lab. (2018). *Temperatura*. Recuperado de <https://www.fisicalab.com/buscar/temperatura#contenidos>.

- Gamio, P. (2016). *Documento de política: Acceso universal a energía y tecnologías renovables 2016-2021*. Lima Perú: CIES. Recuperado de [http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4\\_uibd.nsf/43F104011920E9D005257F530053B136/\\$FILE/Acceso universal a energia y tecnologias renovables.pdf](http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/43F104011920E9D005257F530053B136/$FILE/Acceso%20universal%20a%20energ%C3%ADa%20y%20tecnolog%C3%ADas%20renovables.pdf).
- Gonzales Velasco J. (2013). *Energías Renovables*. Barcelona-España: Reverté.
- Gutierrez Bornes W. (2005). *Implementación de equipo Concentrador Solar Parabólico tipo Shefler*. Chile: GEA UTFSM-Generación de energías alternativas. Recuperado de [http://diagramasde.com/diagramas/otros2/energia\\_concentrador\\_solar\\_scheffler\\_gea\\_utfsm.pdf](http://diagramasde.com/diagramas/otros2/energia_concentrador_solar_scheffler_gea_utfsm.pdf).
- Incropera, F. P. y De Witt, D.P. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor*. Cuarta edición. México: Pretince Hall.
- Andre J.F., De Castro L.M. y Cerdá E. (2009). *Las energías renovables en el ámbito internacional*. Madrid-España: Universidad Complutense de Madrid. Recuperado de [http://www.revistasice.com/CachePDF/CICE\\_83\\_810091ECBB9FFCF682FDFF12C77FAB6D.pdf](http://www.revistasice.com/CachePDF/CICE_83_810091ECBB9FFCF682FDFF12C77FAB6D.pdf).
- Llorens M., Miranda A. L. (2009). *Ingeniería Térmica*. Barcelona España: Marcombo.
- Lovegrove, K., & Stein, W. (2021). Concentrating solar power technology. In Elsevier (Ed.), *Concentrating solar power technology* (Second Ed.). <https://doi.org/10.1533/9780857096173>
- Marroquín García, D. (2011). *Sistema de Control para un Conjunto de Helióstatos* (UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO). Retrieved from <http://www.dgb.unam.mx/index.php/quienes-somos/dudas-y-comentarios>
- Montgomery D. C. (2013). *Diseño y Análisis de Experimentos*. Segunda edición. México: Limusa Wiley.
- Morán M. J. y Shapiro H. N. (2005). *Fundamentos de Termodinámica Técnica*. Segunda edición. Barcelona, España: Editorial Reverté S.A.
- Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., & Grote, K. H. (2007). *Engineering design - A Systematic Approach*. In Springer (Ed.), *Journal of Chemical Information and Modeling* (Third Edit, Vol. 53). Germany: 2007.

- Pérez Enciso, R.A. (2015). *Caracterización óptica y térmica del horno solar del IER*. México: Universidad Autónoma de México.
- Pino, D. M., Ernesto, E. C., G, B. S. J., A, J. B. J., & Florencio, S. (2011). *DISEÑO DE DISCO COLECTOR SOLAR DE PEQUEÑA MODULARIDAD*. 214–220. Retrieved from [http://somim.org.mx/memorias/memorias2011/pdfs/A1/A1\\_106.pdf](http://somim.org.mx/memorias/memorias2011/pdfs/A1/A1_106.pdf)
- REN 21. (2018). *Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. Paris-Francia: Report citation*. Recuperado de [http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2018/06/17-8652\\_GSR2018\\_FullReport\\_web\\_-1.pdf](http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2018/06/17-8652_GSR2018_FullReport_web_-1.pdf)
- Riveros-rosas, D. (2014). *Diseño óptico del Horno Solar de Alto Flujo del CIE-UNAM Energía – Solar fototérmica TUTOR PRINCIPAL :*
- Riveros Rosas, D. (2008). *Diseño Óptico del Horno Solar de alto flujo del CIE-UNAM*. México: Centro de Investigación en Energía (CE). Recuperado de [file:///C:/Users/USUARIO/Downloads/Tesis\\_HornoSolar.pdf](file:///C:/Users/USUARIO/Downloads/Tesis_HornoSolar.pdf)
- Rodríguez, J. (2011). *Uso de hornos solares en I+D: hornos solares, características y funcionamiento*. Curso de Sistemas Solares de Concentración. CIEMAT-PSA
- Rohou M., Mojiri, A. Rosengarten, G. y Andrews J. (2015). *Optical design of a Fresnel concentrating solar system for direct transmission of radiation through an optical fibre bundle*. Solar Energy. Australia: Elsevier. [www.elsevier.com/locate/solener](http://www.elsevier.com/locate/solener)
- Roldán Serrano, M. I. (2013). *Diseño y análisis térmico de un sistema receptor volumétrico para un horno solar de alta temperatura (CIEMAT)*. España.
- Salgado, J. M. (2009). *Tecnología de las Energías Renovables*. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa
- Sedigas (2013). *Guía sobre aplicaciones de la energía solar térmica*. España: Asociación Española del Gas. Recuperado de <https://solar-energia.net/energia-solar-termica/alta-temperatura>.
- Sun Field. (2018). *Energía Fotovoltaica-Radiación, Geometría, Recorrido Óptico, Irradiancia y HPS*. España. Recuperado de <https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/energia-fotovoltaica-radiacion-geometria-recorrido-optico-irradiancia-y-hsp/>.
- Téllez, F. M. (2011). *Introducción a las tecnologías de concentración solar*. Curso de Sistemas Solares de Concentración. CIEMAT-PSA

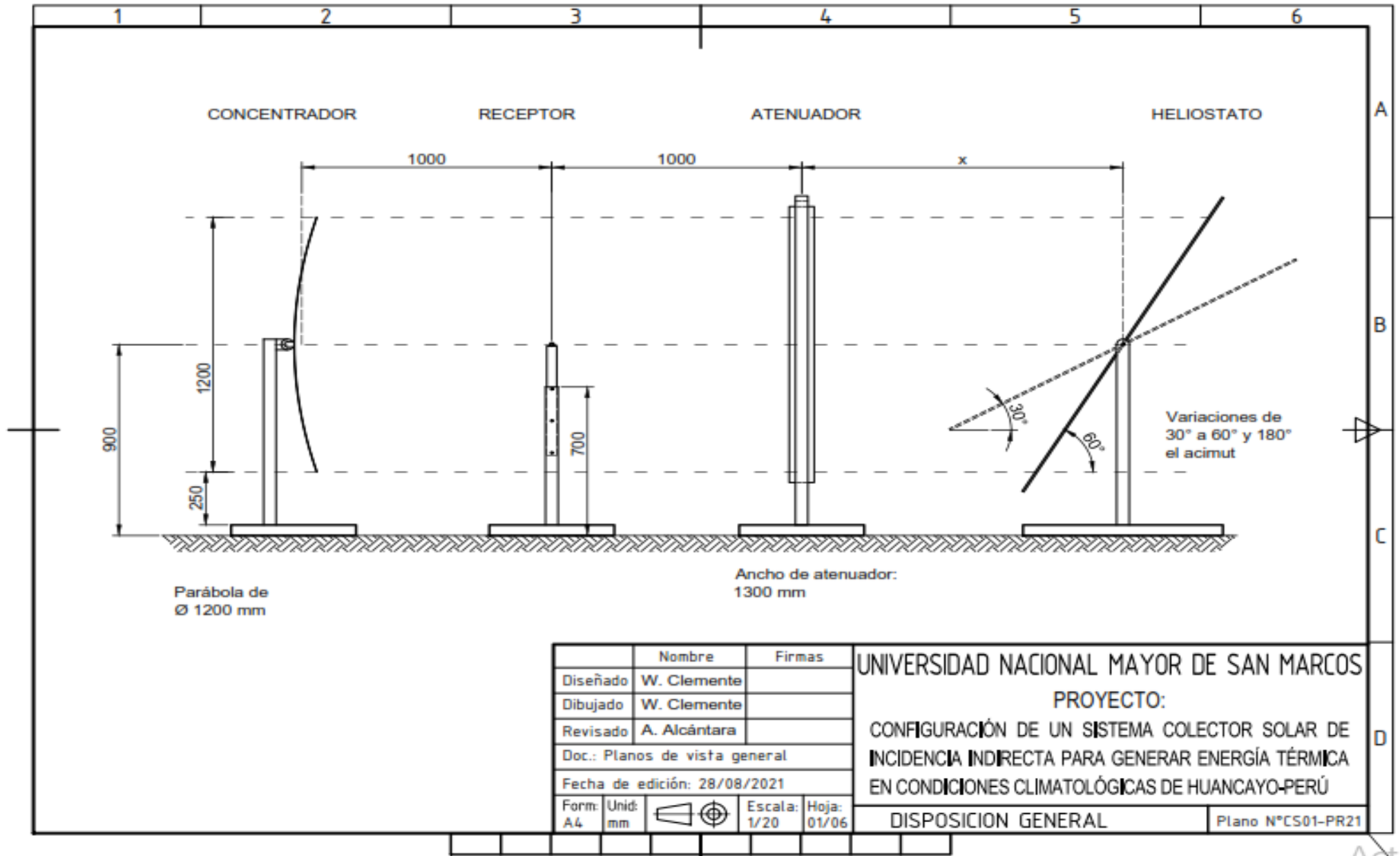
Téllez, F. M.; Denk, T. (2011). *Tecnología de receptores. Curso de Sistemas Solares de Concentración*. CIEMAT-PSA.

Tolmasquim Mauricio, T. (2016). *Energía Renovável, Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceánica*. Brasil: EPE.

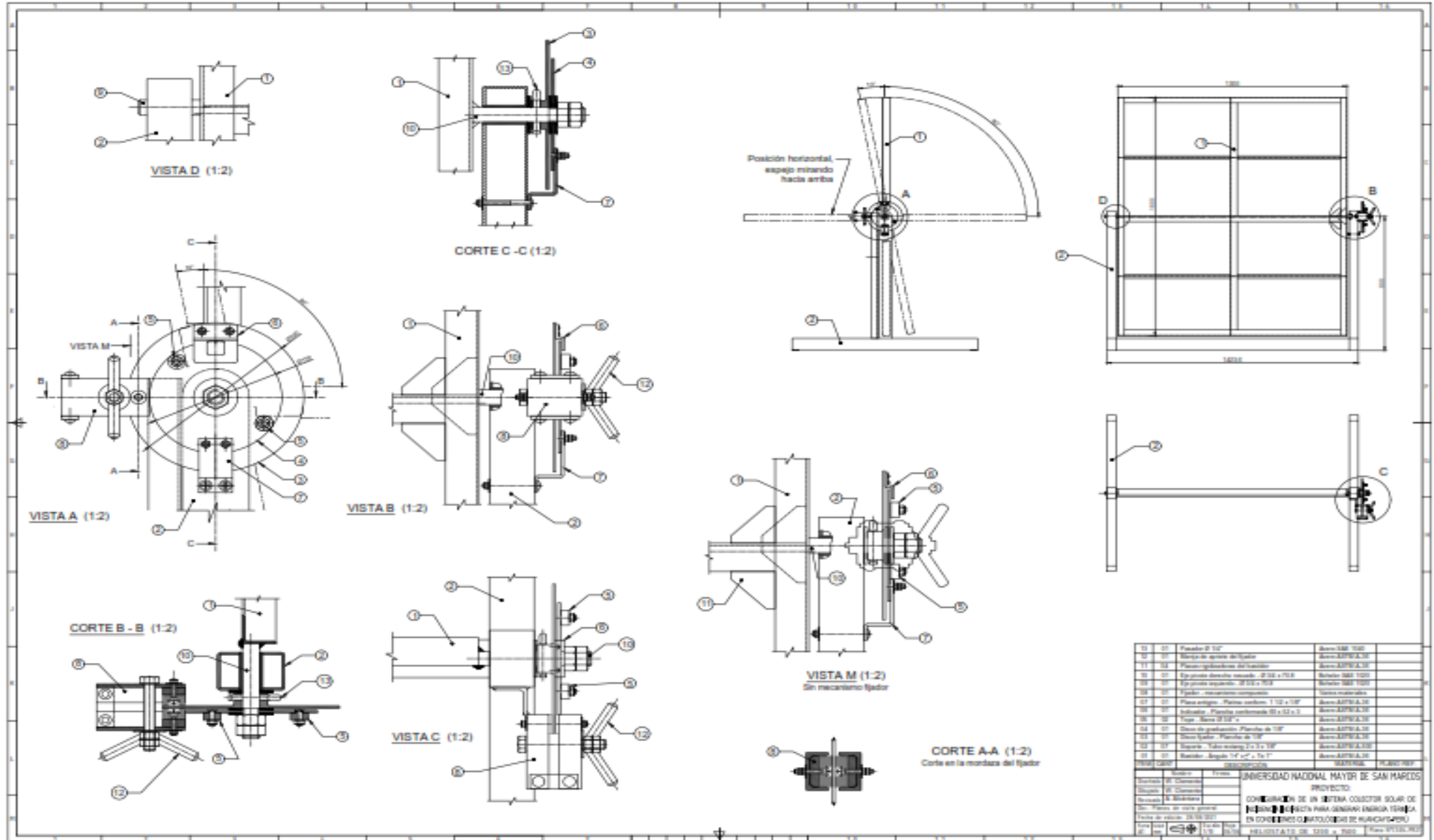
Villeda Muñoz, G. (2010). *Horno Solar de alta temperatura para el cocimiento de tabiques de arcilla*. Querétaro-México: Instituto Politécnico Nacional.

**ANEXOS.**

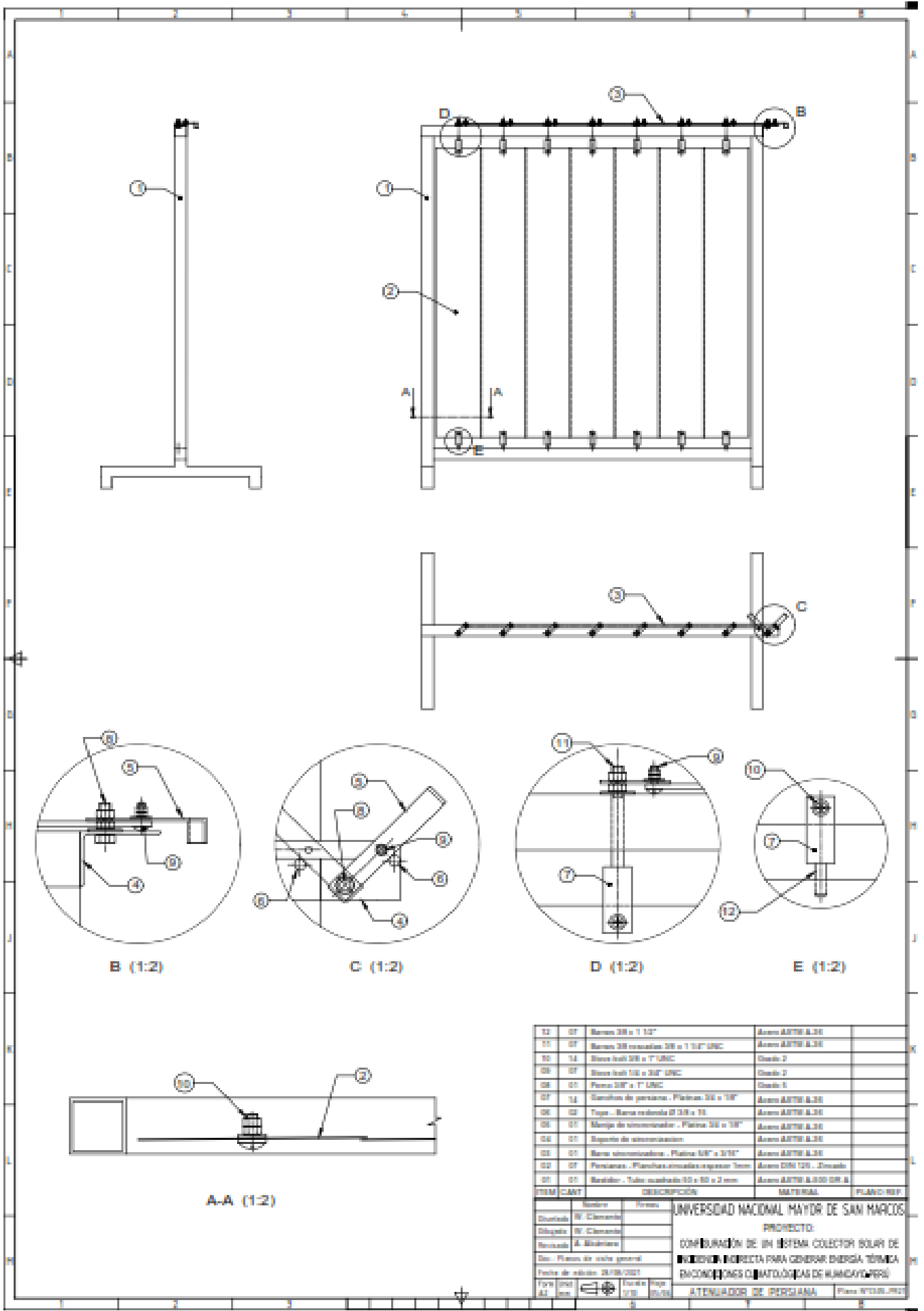
ANEXO 01: Disposición General del SSII



ANEXO 02: Dimensionamiento del Helióstato



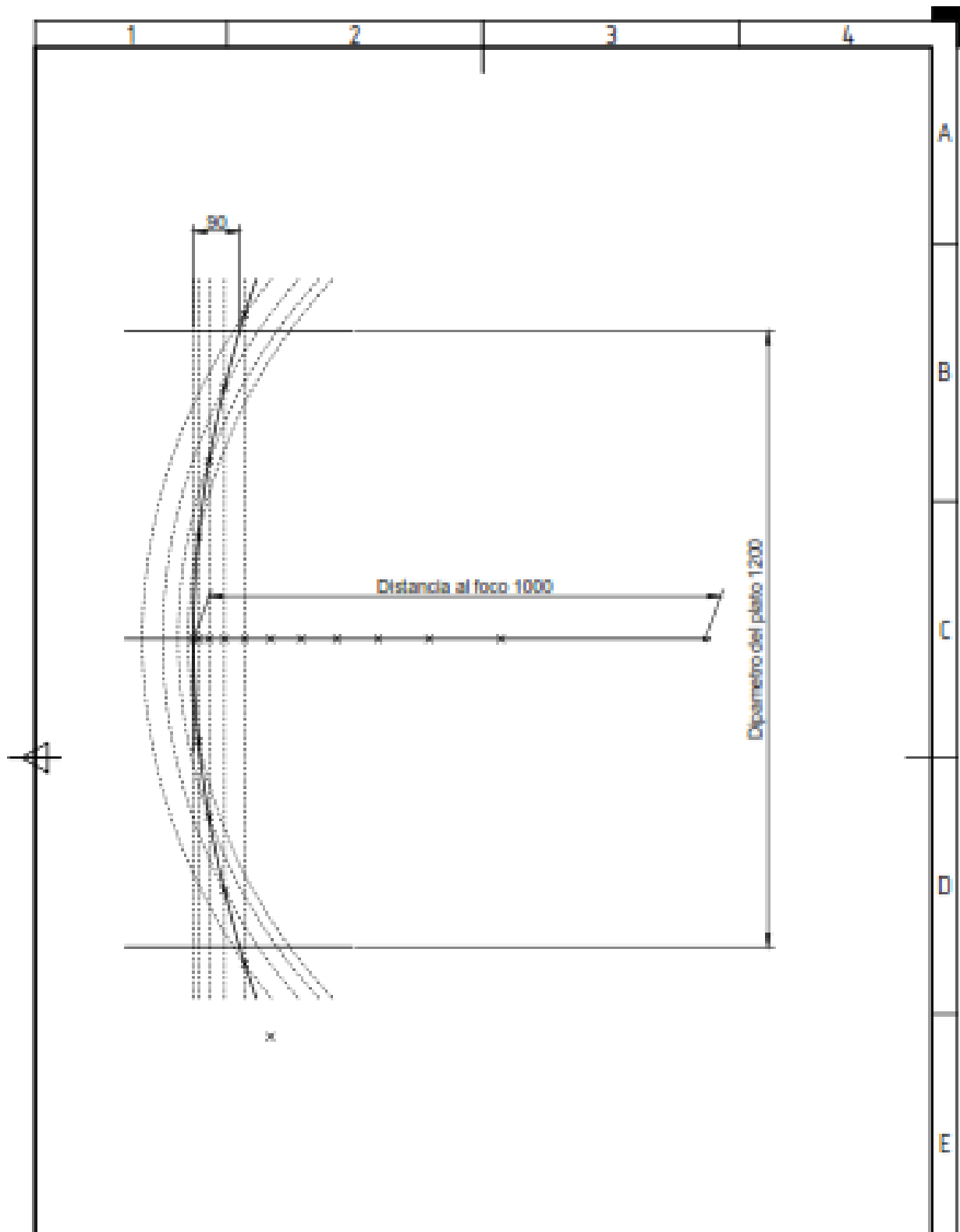
ANEXO 03: Dimensionamiento del atenuador



ITEM	CANT	DESCRIPCION	MATERIAL	PLANO REF.
01	02	Barra 38 x 1 1/2"	Acero A375 A-36	
02	02	Barra 38 roscaada 3/8 x 1 1/4" UNC	Acero A375 A-36	
03	14	Barra hot 38 x 1" UNC	Acero 2	
04	02	Barra hot 38 x 3/4" UNC	Acero 2	
05	01	Perno 3/8" x 1" UNC	Acero 5	
06	14	Carroños de pernos - Placas 38 x 1/4"	Acero A375 A-36	
07	02	Papa - Barra roscaada 2 3/8 x 1/2	Acero A375 A-36	
08	01	Manga de amortiguador - Placa 38 x 1/2"	Acero A375 A-36	
09	01	Tapado de amortiguacion	Acero A375 A-36	
10	01	Barra amortiguadora - Placa 3/8" x 3/16"	Acero A375 A-36	
11	02	Perlas - Planchas roscaadas regular 1mm	Acero DIN 128 - Dincol	
12	01	Resistor - Tubo roscaado 1/2 x 3/4 x 2 mm	Acero A375 A-36 DR 4	

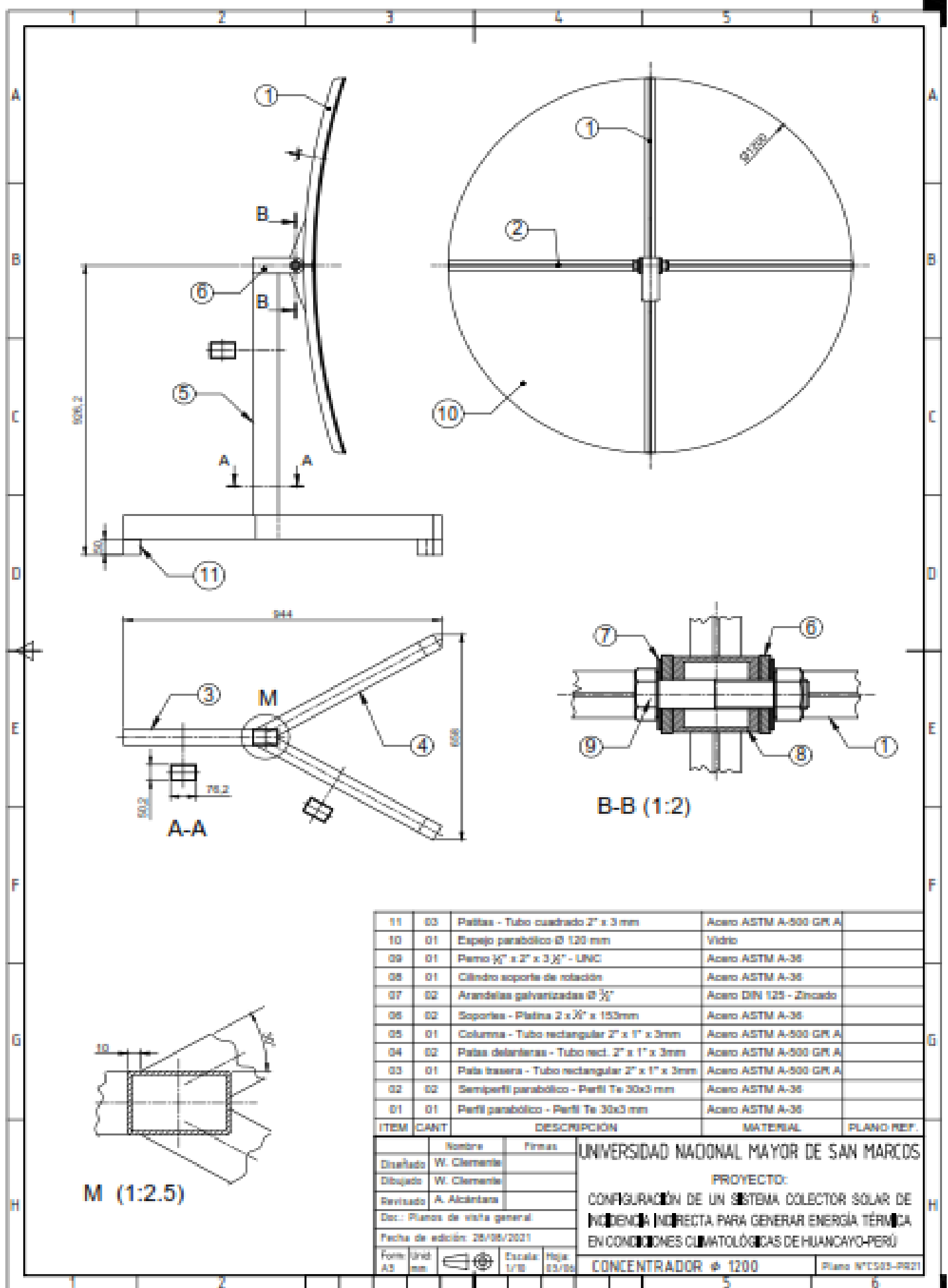
UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS  
 PROYECTO:  
 CONFIGURACIÓN DE UN SISTEMA COLECTOR SOLAR DE  
 BANCOS INCLINADOS PARA GENERAR ENERGÍA TÉRMICA  
 EN CONDICIONES CLIMATOLÓGICAS DE HUNDTAYWERSI  
 ATENUADOR DE PERSIANA Plazo 01/2024

ANEXO 04: Parábola



	Nombre	Firmas	UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS PROYECTO: CONFIGURACIÓN DE UN SISTEMA COLECTOR SOLAR DE INCIDENCIA INDIRECTA PARA GENERAR ENERGÍA TÉRMICA EN CONDICIONES CLIMATOLÓGICAS DE HUANCAYO-PERÚ			
Diseñado	W. Clemente					
Dibujado	W. Clemente					
Revisado	A. Alcántara					
Doc.: Planos de vista general			PERFIL PARABOLICO DEL CONCENTRADOR			
Fecha de edición: 28/08/2021						
Formato	Unid:		Escala:	Hoja:	Plano N°CS02-PR21	
A4	mm		1/20	02/06		

ANEXO 05: Dimensionamiento del concentrador de disco



11	03	Palitas - Tubo cuadrado 2" x 3 mm	Acero ASTM A-500 GR. A	
10	01	Especo parabólico Ø 1200 mm	Vidrio	
09	01	Perno 3/8" x 2" x 3/8" - LINC	Acero ASTM A-36	
08	01	Cilindro soporte de rotación	Acero ASTM A-36	
07	02	Arandelas galvanizadas Ø 3/8"	Acero DIN 125 - Zincado	
06	02	Sopornes - Platina 2 x 2" x 153mm	Acero ASTM A-36	
05	01	Columna - Tubo rectangular 2" x 1" x 3mm	Acero ASTM A-500 GR. A	
04	02	Palas delanteras - Tubo rect. 2" x 1" x 3mm	Acero ASTM A-500 GR. A	
03	01	Palas traseras - Tubo rectangular 2" x 1" x 3mm	Acero ASTM A-500 GR. A	
02	02	Semiparfl parabólico - Perfil Te 30x3 mm	Acero ASTM A-36	
01	01	Perfil parabólico - Perfil Te 30x3 mm	Acero ASTM A-36	
ITEM	CANT	DESCRIPCION	MATERIAL	PLANO REF.

Diseñado		W. Clemente		<b>UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS</b> PROYECTO: CONFIGURACIÓN DE UN SISTEMA COLECTOR SOLAR DE INCIDENCIA INDIRECTA PARA GENERAR ENERGÍA TÉRMICA EN CONDICIONES CLIMATOLÓGICAS DE HUANCAYO-PERÚ <b>CONCENTRADOR Ø 1200</b>	
Dibujado		W. Clemente			
Revisado		A. Alcántara			
Doc.: Planos de vista general					
Fecha de edición: 28/05/2021					
Forma	Unid	Escala	Hoja	Plano NºCS05-0021	
A3	mm	1/10	03/06		

ANEXO 06: Dimensionamiento del receptor.

