FACULTAD DE INGENIERÍA ARQUITECTURA Y URBANISMO

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA

TESIS

DISEÑO DE SISTEMA DE COLECCION SOLAR LINEAL PARA GENERACION DE VAPOR EN LA PLANTA PILOTO DE LA UNIVERSIDAD SEÑOR DE SIPAN – PIMENTEL

PARA OPTAR POR EL TITULO PROFESIONAL DEL INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

Autor

Bach. Abanto Diaz, Frances André

https://orcid.org/0000-0002-8518-9337

Asesor

Dr. Jorge Antonio Olórtegui Yume, Ph.D.

https://orcid.org/0000-0001-5734-040X

Línea de Investigación

Infraestructura, Tecnología y Medio Ambiente

Pimentel – Perú

2020

DISEÑO DE SISTEMA DE COLECCCION SOLAR LINEAL PARA GENERACION DE VAPOR EN LA PLANTA PILOTO DE LA UNIVERSIDAD SEÑOR DE SIPAN – PIMENTEL

Presentado a la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Universidad Señor de Sipán para optar el Título Professional de Ingeniería Mecánica Eléctrica.

APROBADO POR:

Mg. Alvarado Silva Carlos Alexis
Presidente del Jurado de Tesis

Mg. Gastiaburu Morales Silvia Yvone
Secretaria(o) del Jurado de Tesis

Mg. Vives Garnique Juan Carlos
Vocal del Jurado de Tesis

PIMENTEL

2020

DEDICATORIA

A mi madre Frezia Diaz Mestanza por demostrarme su apoyo de innumerables maneras…

Por su carácter jovial que me dio ánimos para seguir con aquellos sueños que cuando niño no dejaba de recitarle

A todas las demás personas que me trasmitieron frases de aliento para hacer de esta investigación un documento memorable.

Frances Abanto Díaz

AGRADECIMIENTO

Le agradezco a mi asesor el Dr. Jorge Olortegui Yume, por compartir de su conocimiento para crecer humana y profesionalmente, así también por su esplendidez al brindarme la oportunidad de recurrir a su saber y experiencia científica, por permitirme trabajar en un ambiente de confianza para la realización de esta investigación.

A los profesionales que tuve el placer de conocer en mi vida laborar quienes, con gran profesionalismo, aportaron criticas valiosas para que obtuviera un mejor horizonte de mi investigación.

Un sincero agradecimiento a mi familia en general, que siempre ha estado apoyándome desde el inicio de mi carrera profesional, hasta hoy, “ad portas” de mi graduación. Mi madre en especial por estar ahí cuando más lo necesite, a Eimy Liz, quien más que una hermana es mi mejor amiga, siempre escuchándome y con quien he compartido momentos inolvidables: una sonrisa en el rostro. Mi abuelo Exmelin Diaz Malpica, ocupa un pedestal especial de admiración y paternal respeto, por ser la persona que me enseñó a nunca darme por vencido por más fatigado que me encuentre.

Por último, y no menos importantes, quiero agradecer a mis amigos y amigas con quienes he compartido experiencias de vida las cuales tienen un lugar especial en este párrafo. Todos hicieron más llevadero este camino sacrificado pero gratificante de investigación.

DISEÑO DE SISTEMA DE COLECCCION SOLAR LINEAL PARA GENERACION DE VAPOR EN LA PLANTA PILOTO DE LA UNIVERSIDAD SEÑOR DE SIPAN – PIMENTEL

Abanto Diaz Frances André [1]

RESUMEN

El presente trabajo académico se centra en el diseño de un colector solar lineal para generación de vapor en la planta piloto de la universidad señor de Sipán – Pimentel.

Las necesidades de la planta piloto de determino mediante entrevistas. Se realizó la búsqueda de estándares de diseño, determinando su inexistencia por ser una tecnología en desarrollo, por lo tanto, se siguió las recomendaciones de investigaciones desarrolladas hasta el momento. Luego, se generaron 4 conceptos de geometría que podían solucionar el problema, los cuales fueron evaluados mediante una matriz de selección de criterios ponderados para brindar un concepto viable.

En consecuencia, se desarrolló el diseño de configuración al concepto seleccionado para luego realizar el dimensionamiento del sistema Colector Lineal Fresnel. Para luego analizar las cargas térmicas relacionadas al concepto del sistema concentrador y el tubo absorbedor, apoyados del software para el desarrollo de ecuaciones matemáticas MATLAB.

Con el diseño paramétrico se comparó la producción y la temperatura del vapor para diámetros de tubería de 1”, 1.5” y 2” quedando seleccionado la tubería de 1” pues da mayor flujo masico de vapor a mayor temperatura. Después de determinar el diámetro se realizó la selección de los componentes asociados como el material reflectante para los espejos y la cubierta de vidrio.

El costo para la realización del sistema LFR es de S/. 4649.54 y el retorno de la inversión es de 9 meses, lográndose tener después del primer un beneficio anual de S/. 6732.00.

PALABRAS CLAVE: Colector solar, Generación de vapor, Colector Lineal Fresnel, Sistema concentrador, Tubo absorbedor.

DESIGN OF SOLAR LINEAR COLLECTION SYSTEM FOR THE GENERATION OF STEAM IN THE PILOT PLANT OF THE UNIVERSIDAD SEÑOR DE SIPAN – PIMENTEL

Abanto Diaz Frances André [1]

ABSTRAC

This academic work focuses on the design of a linear solar collector for steam generation in the pilot plant of the Señor de Sipán - Pimentel University.

The needs of the pilot plant were determined through interviews. The search for design standards was carried out, determining their non-existence as a developing technology, therefore, the research recommendations developed so far were followed. Then, 4 geometry concepts that could solve the problem were generated, which were evaluated using a weighted criteria selection matrix to provide a viable concept.

Consequently, the configuration design for the selected concept was developed to later perform the sizing of the Linear Fresnel Collector system. To then analyze the thermal loads related to the concept of the concentrator system and the absorber tube, supported by the software for the development of MATLAB mathematical equations.

With the parametric design, the steam production and temperature were compared for 1”, 1.5” and 2” pipe diameters. The 1” pipe was selected because it gives more mass steam flow at a higher temperature. After determining the diameter, the selection of associated components was made, such as the reflective material for the mirrors and the glass cover.

The cost to carry out the LFR system is S /. 4649.54 and the return on investment is 9 months, achieving after the first one an annual profit of S /. 6732.00.

KEYWORDS: Solar collector, Steam generation, Linear Fresnel collector, Concentrator system, Absorber tube.

[1]Adscrito a la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica, Pregrado, Universidad Señor de Sipán, Pimentel, Perú, email: adiazfan@crece.uss.edu.pe. https://orcid.org/0000-0002-8518-9337.

INDICE

INDICE VII
I. INTRODUCCION 13
1.1 REALIDAD PROBLEMÁTICA 13
1.2 TRABAJO PREVIOS 15
1.3 TEORÍAS RELACIONADAS AL TEMA 19
1.3.1 Energía Termosolar de Concentración 19
1.3.2 Clasificación de Instalaciones Termosolares 20
1.3.3 Partes principales de un Sistema Colector por Reflexión Tipo Fresnel 22
1.3.4 Principio de Funcionamiento de un Sistema LFR 25
1.3.5 Diseño de Reflectores Lineales Fresnel 26
1.3.6 Diseño del Concentrador: 27
1.3.7 Definición de términos 49
1.3.8 Software de diseño 50
1.4 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA 52
1.5 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DEL ESTUDIO. 52
1.6 HIPÓTESIS 52
1.7 OBJETIVOS 53
1.7.1 Objetivo general 53
1.7.2 Objetivos específicos 53
1.8 ESTADO DEL ARTE 53
II. MATERIAL Y METODOS 56
2.1 Tipo y Diseño de Investigación 56
2.2 Variables 56
2.2.1 Caja negra para variables 56
2.2.2 Operacionalización de Variables 58
2.3 Población y Muestra 59
2.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos, variables y confiabilidad 59
2.4.1 Técnicas de recolección de datos 59
2.4.2 Instrumentos de recolección de datos 60
2.4.3 Procedimiento para la recolección de datos 60
2.5 Métodos de análisis de datos 62
2.6 Aspectos éticos 62
III. RESULTADOS 64
3.1 Determinación de necesidades de la Planta Piloto 64

3.2 Recomendaciones para diseñar un Sistema LFR 67
3.3 Especificaciones ingenieriles 68
3.4 Diseño conceptual 69
3.5 Matriz de Selección 73
3.6 Diseño de Configuración 75
3.7 Selección de Material 76
3.7.1 Material de Tubo Absorbedor 76
3.7.2 Material de los Espejos 77
3.7.3 Material de la Estructura 77
3.8 Dimensionamiento del Sistema LFR 77
3.9 Cálculo de cargas Térmicas 79
3.10 Análisis paramétrico 85
3.11 Diseño de selección 87
3.12 Elaboración de Planos del Sistema LFR 91
3.13 Análisis económico 92
3.13.1 Presupuesto 92
3.13.2 Flujo de caja 93
3.14 Plan de Mantenimiento 96
3.15 DISCUSION 98
IV. CONCLUSIONES 101
V. REFERENCIAS 102
VI. ANEXOS 105

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Características de las tecnologías de concentración solar 22
Tabla 2: Operacionalización de variables para el sistema de colección lineal 58
Tabla 3: Requerimientos de la Planta Piloto para el diseño del LFR 66
Tabla 4: Recomendaciones de Diseño 67
Tabla 5: Recomendaciones de Diseño (Continuación) 68
Tabla 6: Especificaciones Ingenieriles 69
Tabla 7: Grado de satisfacción 73
Tabla 8: Criterios de Ponderado 73
Tabla 9: Selección de concepto optimo mediante matriz de selección 74
Tabla 10: Matriz de ponderado para receptor 76
Tabla 11: Parámetros de entrada para el diseño del colector 80
Tabla 12: Propiedades del Espejo 81
Tabla 13: Angulo de inclinación de cada fila de espejo al medio día 83
Tabla 14: Propiedades físicas del aire interpoladas para la temperatura promedio T p-air 84
Tabla 15: Propiedades físicas del agua interpoladas para la temperatura promedio T p-agua 84
Tabla 16: Propiedades del Tubo de Cobre 87
Tabla 17: Propiedades de la lámina reflectante 88
Tabla 18: Planos de Diseño 91
Tabla 19: Presupuesto para el colector tipo Fresnel 92
Tabla 20: Resumen general de costos de fabricación 93
Tabla 21: Plan de Mantenimiento para el sistema de colección solar lineal 97

INDICE DE IMÁGENES

Figura 1: Caldero Pirotubular 14
Figura 2: Tipos de Instalaciones Termosolares 20
Figura 3: Configuración del Concentrador Lineal Fresnel - Vista Frontal 22
Figura 4: Espejo reflector sostenido por su estructura 23
Figura 5: Sistema de seguimiento de un sistema LFR 24
Figura 6: Configuración del Receptor 24
Figura 7: Lente Fresnel de base Curva 25
Figura 8: Principio de funcionamiento del LFR 26
Figura 9: Diseño básico para un LFR 27
Figura 10: Diseño básico en un LFR 28
Figura 11: Angulo de declinación del solsticio de verano 30
Figura 12: Tiempo sidéreo 30
Figura 13: Ecuación del Tiempo 31
Figura 14: Sistema de Coordenadas Horizontales 32
Figura 15: Definición de latitud, ángulo horario y declinación solar 33
Figura 16: Trayectoria aparente del sol a través del cielo desde el amanecer 35
Figura 17: Diagrama de ángulos solares. 36
Figura 18: Ángulos incidente y de refracción para un haz de luz. 38
Figura 19: Radiación de entrada y perdidas de calor en un receptor cilíndrico. 41
Figura 20: Radiación de entrada y perdidas de calor en un colector. 45
Figura 21: Flujo de energía a través de un elemento del tubo 48
Figura 22: Logo del Software Matlab 50
Figura 23: Logo del Software SolidWorks. 51
Figura 24: Tubos absorbentes desarrollados en Fraunhofer ISE 54
Figura 25: Diagrama de Caja Negra para el sistema LFR 57
Figura 26: Diagrama de Flujo para el proceso de recolección de datos 61
Figura 27: Concentrador Cilindro – Parabólico 70
Figura 28: Concentrador lineal Fresnel 71
Figura 29: Concentrador Solar Por Torre 72
Figura 30: Concentrador de Disco Parabólico 72
Figura 31: Receptor de un tubo 75
Figura 32: Receptor Multitubo 76
Figura 33: Dimensionamiento del Sistema LFR 78
Figura 34: Componentes del Sistema LFR 79
Figura 35: Ecuación de tiempo a lo largo del año. 81
Figura 36: Esquema de un concentrador lineal tipo Fresnel. 82
Figura 37: Grafica paramétrica de temperatura final vs el flujo másico del vapor. 85
Figura 38: Grafica paramétrica de temperatura final vs el flujo másico del vapor. 86
Figura 39: Tubería de cobre. 87
Figura 40: Película adhesiva reflectante. 88
Figura 41: Tubo cuadrado ASTM A500. 89
Figura 41: Tubo de Vidrio borosilicato. 89
Figura 43: Platina de acero A36. 90
Figura 44: Tubo de acero ASTM A500 90

Figura 45: Chumacera SY 1. TF. 91
Figura 46: Periodo de retorno de la inversión (PRI). 94
Figura 47: Flujo de caja anual. 95
Figura 48: Tiempo de recuperación de la inversión. 95
Figura 49: Ecuación de tiempo a lo largo del año. 119
Figura 50: Ángulos representativos para un rayo reflejado hacia el colector. 121

CAPITULO I

INTRODUCCION

I. INTRODUCCION

1.1 REALIDAD PROBLEMÁTICA

Muchas de las actividades industriales a nivel mundial hacen uso de los combustibles fósiles para su desarrollo, estas van desde la calefacción hasta la producción de energía en plantas térmicas. Sin embargo, las políticas energéticas globales están cambiando, orientándose a dejar una menor huella de carbono en el medio ambiente (International Energy Agency, 2015). La Agencia Internacional de Energía (IEA) en su publicación "Energy Technology Perspectives 2015", incluye la Energía Térmica Solar como una de las tecnologías más rentables que reducirán las emisiones de CO_2. Esto contribuye a reducir las emisiones globales de CO_2 en un 70% para el año 2060, limitando el incremento global de temperatura en un 2% (International Energy Agency, 2017). Se espera que la Electricidad Solar Térmica (STE) generada por la Energía Solar Concentrada (CSP) contribuya con el 11% de la producción mundial de electricidad al 2050 (International Energy Agency, 2014).

Las zonas más favorables para el aprovechamiento de la energía solar a través de CSP incluyen países latinoamericanos como México, Perú y Chile (International Energy Agency, 2010). Se esperan mejoras tecnológicas en los elementos de la CSP, así mismo la reducción en los costos para implementación e ingeniería. El factor de capacidad energética de salida, ha mejorado aplicando sistemas de almacenamiento térmico. En el concentrador Lineal tipo Fresnel sin un sistema de almacenamiento para el 2016, tiene un costo menor a los 3000 dólares por kW con una capacidad máxima de 100 MW de potencia eléctrica, con un factor de capacidad menor a 0,2. Los nuevos proyectos se han replanteado en lugares con mayor Irradiación Directa Normal (DNI) que en España, específicamente en Chile, Sudáfrica, Marruecos, etc. (International Renewable Energy Agency (IRENA), 2017)

Actualmente en nuestro país el desarrollo de energías renovables, específicamente en el diseño de sistemas de concentración solar es primitiva, a diferencia de otros países en los cuales utilizan esta tecnología para la generación de electricidad a gran escala a través de plantas termoeléctricas. Al tener un gran potencial solar en nuestra región, es necesario contribuir y profundizar las investigaciones para encontrar la viabilidad de la misma. El diseño y construcción o mejora de los prototipos orientados

a la obtención de vapor de agua u otro líquido a altas temperaturas, sería el primer paso pensando en la generación de energía eléctrica ya que esta siempre será una necesidad en este mundo moderno que cada día requiere de mayor energía para mejorar su calidad de vida. (Polo Bravo & Sacari Sacari, 2009)

La Universidad Señor de Sipán fue fundada el 05 de julio de 1999, ubicada en la carretera a Pimentel Km 5. Cuenta con una Planta Piloto Industrial a cargo de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Agroindustrial y Comercio Exterior, donde los estudiantes realizan prácticas de aprendizaje e investigación.

Actualmente, la Planta Piloto usada para procesos industriales pedagógicos, posee equipos que necesitan de vapor saturado como parte de los procesos en la transformación de materia prima, para esto cuentan con un caldero pirotubular de 8BHP con un quemador Suntec Modelo A2VA – 7116 (Figura 1), empleando Diésel para la combustión. El proceso demanda gran cantidad de combustible Diésel lo cual naturalmente produce gases residuales que impactan en el medio ambiente. Por tanto, el diseño de un sistema hibrido, donde el colector solar, basado en el principio de funcionamiento de lentes fresnel contribuya en la producción de vapor, podrá disminuir el consumo de combustible, abaratando costos en los procesos de la planta.

Figura 1: Caldero Pirotubular

Fuente: Propia

El presente proyecto consiste en diseñar un colector solar lineal tipo Fresnel de generación de vapor en la Planta Piloto de la USS – Chiclayo, para reducir los costos de la generación de vapor.

1.2 TRABAJO PREVIOS

La literatura especializada indica como antecedentes de investigación de este trabajo a los que se consigna a continuación.

Dascomb John, (DASCOMB, 2009) Diseñó un sistema concentrador solar de platos de bajo costo para generación de vapor, que fue construido en la Universidad Estatal de Florida. El objetivo del proyecto era proporcionar 6.67 kW, que es la energía térmica requerida para producir 1kW de electricidad con una micro turbina de vapor. Utilizando un absorbedor de tipo cavidad en lugar de un plato, aumentó la absorción, disminuyendo las pérdidas por convección. Este nuevo diseño tuvo un aumento del 333% respecto al primer concentrador que solamente proporcionaba 1kW de energía térmica. Aunque no se llegó a obtener 6.67kW de potencia térmica, los autores recomiendan mejorar la configuración del concentrador, para que poder captar mayor radiación y de este modo alcanzar una eficiencia termina ideal de 48%.

R.R Udawant, (Udawant, Mohite, & Takwale, 2016) Realizaron un estudio del rendimiento de un concentrador solar de lente Fresnel para generación directa de vapor en la Universidad de Pune, India. La lente concentra la radiación en un foco lineal directamente sobre el receptor, aumentando la temperatura del agua. En el estudio se evaluó la ganancia de calor útil del sistema cuando se expone a la radiación solar, se aplicó dos métodos: el método de ensayo de flujo continuo, aplicando HYTHERM 600 como fluido térmico, lo datos se tomaron variando el flujo del caudal térmico de 0,5 LPM a 1 LPM, siendo la temperatura máxima obtenida de 120°C entre las 10:30 a 14:00 horas con cielo despejado, concluyendo que cuando el caudal másico aumenta tanto la eficiencia óptica como el coeficiente de perdida de calor aumenta. En el método de prueba de generación de vapor, aplicando agua como fluido se obtuvo una eficiencia total del sistema del 51% con una presión máxima de 1,8 Kg/cm^2 entre las 12:40 y 13:00 horas con una irradiación de 877.5 W/m^2. Siendo este sistema útil para generar vapor de baja presión para diversas aplicaciones de procesos industriales.

Schlaifer Perrine, (Schlaifer, 2012) Estudió el rendimiento de una planta de energía termosolar de concentración lineal Fresnel de 9MW, en Suecia, siendo el objetivo calcular la producción anual de electricidad en criterio a las condiciones meteorológicas, así como el modelamiento de acumuladores de vapor, a fin de estimar la evolución de la presión en lo tanques durante los procesos de carga, almacenamiento y descarga. En tanto se planteó su diseño con un volumen de 120m^3 regulada en 70 bares, que es la presión nominal de la turbina de la planta, durante el proceso de descarga la salida del vapor saturado en masa de flujo constante fue de 1Kg/s, luego que el proceso de carga duro 1 hora 50 minutos. Finalmente se concluyó que al aplicar un nuevo sistema de coordenadas esféricas con una pendiente de 4,21° en la ubicación de la planta, se aumenta la energía térmica disponible al final del campo en un 14,4%, en tanto se vio un aumento del 12,59% de la producción anual de electricidad y hasta un 2,84% de perdidas debido a los días con temperatura y humedad más bajas.

Revelo Benavides Mayra, (Revelo Benavides & Salazar Muñoz, 2015) Diseñó un Colector Solar Lineal Fresnel para la obtención de vapor de agua en la ciudad de Quito, con la finalidad de satisfacer las demandas térmicas y disminuir el consumo de combustible fósiles, valiéndose de materiales viables de obtener en el mercado local. Una vez definido sus características geométricas con Acero ASTM A-36 galvanizado para su estructura y un Colector de Aluminio H14 liso de 2mm de espesor con una tubería de ¾” de cobre con una longitud de 6m cumpliendo la función de absorber está la radiación solar. Finalmente, con ayuda del software Soltrace simularon el rendimiento óptico y el Matlab para las ecuaciones de los fenómenos termodinámicos y de transferencia de calor, luego de las estimaciones planteadas obtuvieron una temperatura de salida de 215 ° C a la salida del captador cilíndrico. Para alcanzar altas temperaturas en el fluido, se recubrió con una pintura en cromo negro, el tubo absorbedor, disminuyendo la emisividad del tubo. Así mismo no se pudo alcanzar gran volumen de vapor, por cual se planteó la implementación de un sistema de almacenamiento de energía.

Balado Leal Emilio, (Balado Leal, 2011) Ha realizado un estudio energético de un colector cilíndrico parabólico, con la finalidad de dimensionar un campo solar para obtener una potencia térmica de 1MW para procesos industriales, tomando los parámetros de diseño correspondientes a un módulo de colector cilindro parabólico Eurotrough II y a un tubo captador SOLEL UVAC3. El procedimiento de evaluación aplicando un aceite térmico como fluido caloportador, obtuvo un máximo rendimiento del 75% con una irradiación de 800W/m^2 a una temperatura ambiente de 25°C y sin viento. En tanto la temperatura útil se establece entre 250°C y 300°C respectivamente, apreciando una pérdida del rendimiento al trabajar con mayores temperaturas. Se concluye que el rendimiento térmico del modelo diseñado depende de la variación en la temperatura debidamente relacionado a la emisividad del tubo absorbedor.

Gómez Mercado Abdiel, (Gómez Mercado, Aguilar Flores, & Rodríguez Castillo, 2013) Diseñaron un concentrador solar tipo cilindro-parabólico para generar energía eléctrica en el Instituto Tecnológico de Pachuca, México. Siendo su objetivo realizar un análisis termodinámico del proceso de captación y concentración de la energía solar, teniendo en cuenta parámetros como las propiedades físicas del tubo receptor y condiciones climáticas propias del lugar. Luego del estudio teórico en el cual se dimensiono un receptor de 1,8 de longitud con un diámetro externo de 5,8 cm siendo el interior de cobre por capacidad de absorción térmica se logró un rendimiento del 76,9% con una radiación máxima de 5,44kWh/m^2 a una temperatura ambiente de 26°C, siendo este procedimiento validado por el software Ansys Fluent a fin de conseguir un comportamiento bajo un entorno real, concluyendo que el fluido alcanzaría una temperatura de 313°C, siendo esta bastante aceptable con lo que se pudo validar una pérdida de energía de 331,7 W/m^2°C.

Loayza Ochoa, (Loayza Ochoa, 2012) Diseñó e implementó un seguidor solar para el reflector parabólico de tipo Scheffler, que fue elaborado por el Grupo PUCP en Lima. El proyecto al ser aplicado en zonas rurales, debe tener un diseño económico y de fácil montaje, que además se adapte a la estructura existente del reflector, se revisó y analizó varias teorías, validando un sistema de seguimiento en un eje con control por

programación astronómica, cuyo método se basa en la relación de rotación de 360° que gira la tierra en las 24 horas que dura un día, determinando que se debe mover el concentrador 15° cada hora durante las 12 horas de luz solar. El diseño estudiado cuenta con un microcontrolador PIC, que verifica mediante un algoritmo la posición del reflector para que corresponda a la dirección solar según la hora en tiempo real, el cual tiene una rotación de 5° cada 20 minutos, alcanzando una rotación máxima de 150° debido a las limitaciones del motor actuador de CC, estableciendo una demarcación entre 30° y 150° de rotación. Se obtuvo un modelo de bajo consumo de energía eléctrica con un error del 5% en el direccionamiento de radiación solar, que finalmente tiene un coste entre los 100 a 120 soles.

Erich Saettone, (Saettone O., 2012) Diseñó y construyó un concentrador Solar tipo Fresnel Lineal para desalinizar agua, aplicado en Cocayalta, Lima. Estudiaron determinadas relaciones angulares para establecer los criterios del recorrido por la radiación solar reflejada en el panel de espejos. Montado 32 espejos con la función de reflector con 2,5m de largo por 0,07m de ancho, orientados de Este a Oeste, con un colector rectangular de Al anodizado a 2,5m de altura respecto al reflector. Los espejos fueron alineados individualmente a la trayectoria del sol entre las 8am y las 4pm, con el método de marcado de sombras. El diseño ejecutado y analizado fue puesto a prueba entre las 10am y las 3pm, alcanzando el concentrador una máxima temperatura de 102 °C con un Irradiación Solar de aproximadamente 750 W/m^2 a las 12pm, obteniendo un total de 3.15L de agua desalinizada, volumen considerado menor a la que se puede lograr en otros puntos del país. La metodología aplicada permite estudiar los efectos de área efectiva, dispersión y traslape a partir de las relaciones angulares, determinando un modelo que no dependa de energía eléctrica para un sistema electromecánico de seguimiento solar. Se concluye que el diseño obtenido es eficiente y requiere una baja inversión.

Jorge Bazán (Bazán Díaz, 2009) Realizo el diseño de un Concentrador Solar Cilindro – Parabólico, que brinde de energía térmica a una cámara para deshidratar frutas y otros alimentos. Se analizó un modelo teórico desarrollado en el Software de Microsoft Excel para estimar los cálculos de diseño. Estimando primero el número de

concentradores, habiendo que calcular el valor de radiación concentrada producida en total, obteniendo 10 colectores de Aluminio pulido con una conductividad térmica de (237 W/m°C). Para el receptor se implementó tubería de cobre de 2cm de diámetro externo con un espesor de 1mm, con agua como fluido caloportador. En el diseño estudiado se analizó distintos parámetros durante un año, obteniendo una máxima eficiencia de 65,22% en el mes de Junio a una temperatura ambiente de 22,8 °C, con una radiación solar de 4,283 kW/m2 que fue obtenida de la estación meteorológica de la Universidad de Piura (UDEP), alcanzando un temperatura de 178,41 °C en el exterior del receptor. El cálculo matemático aplicando en Excel es bastante satisfactorio y revalida la viabilidad de las energías renovables para cubrir demandas energéticas. En el análisis económico se determina un periodo de 7,92 años para recuperar la inversión con una tasa interna de retorno de 11%, siendo favorable respecto a la tasa de interés bancario en este ámbito de inversiones. Se comprobó el potencial del dispositivo diseñado para poder cubrir la demanda de energía, además de ser un modelo asequible y eco-amigable.

1.3 TEORÍAS RELACIONADAS AL TEMA

1.3.1 Energía Termosolar de Concentración

Denominada (CSP) por sus siglas en ingles Concentrated Solar Power, que se basa en la concentración de radiación solar para obtener energía térmica a alta temperatura. Para concentrar la energía solar, la mayoría los sistemas usan espejos de vidrio con hasta 95% de reflectividad, que siguen constantemente la trayectoria del sol con un sistema de rastreo, para aprovechar la radiación solar directa. La ventaja de las plantas CSP es poder almacenar parte de la energía generada en un sistema de almacenamiento térmico. Como se puede ver en la Figura 2 las instalaciones solares se clasifican en dos tipos: Los que concentran la radiación solar en un área puntual y los que concentran la radiación en un área lineal. (Palenzuela, Alarcon Padilla, & Zaragoza, 2015)

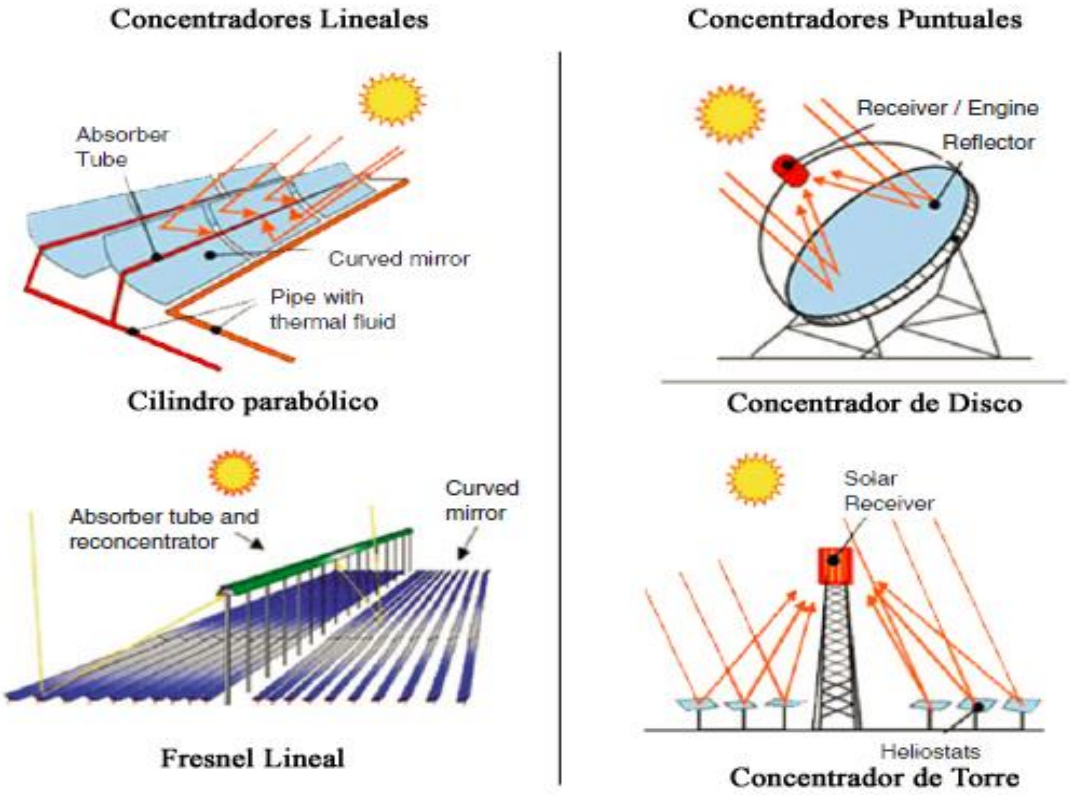


Figura 2: Tipos de Instalaciones Termosolares

Fuente: (Palenzuela, Alarcon Padilla, & Zaragoza, 2015)

1.3.2 Clasificación de Instalaciones Termosolares

A. Colector Cilindro – Parabólico

Estos colectores consisten en espejos largos en forma de U con un eje lineal y sistema de seguimiento solar. Los espejos reflejan la radiación solar directa a lo largo de su línea focal, donde se encuentra un tubo absorbedor. Para evitar la pérdida de calor respecto al aire ambiente, el tubo absorbente está encerrado por un tubo de vidrio al vacío. Un fluido caloportador fluye a través del tubo absorbiendo la radiación concentrada. El fluido comúnmente utilizado es el aceite térmico, aunque el uso de agua / vapor o sal fundida también está siendo investigado. (Palenzuela, Alarcon Padilla, & Zaragoza, 2015)

B. Colector Lineal Fresnel

Los colectores en un sistema lineal de Fresnel se componen de un gran número de espejos planos, que pueden seguir individualmente la trayectoria del sol, concentrando la radiación en un área lineal a lo largo del tubo receptor. El tubo receptor del sistema Fresnel están en una posición fija por encima de los espejos en el centro del campo solar. El sistema puede operar con aceite, agua o sales fundidas. Los diseños actuales usan agua directamente en los tubos receptores en 50 bares de presión y 280 °C. La ventaja de este sistema de concentración tiene un costo menor que los sistemas cilindro-parabólicos, por sus bajos costos de inversión, operación y mantenimiento. Su desventaja es la simplicidad de su diseño óptico, obteniendo una menos eficiencia, necesitando así aproximadamente un 33% más en área, para la misma producción de energía térmica respecto al colector cilindro-parabólico. (Palenzuela, Alarcon Padilla, & Zaragoza, 2015)

C. Concentrador Solar por Torre

Este sistema usa un gran campo de Heliostatos (espejos), con sistema de rastreo solar en dos ejes, los que reflejan la radiación solar hacia un receptor central ubicado en la parte superior de una torre. Este sistema puede operar con agua, sodio líquido o sales de nitrato fundido, como fluido caloportador para un receptor tipo tubular, y para el tipo volumétrico, se usa aire para absorber el calor concentrado en el cuerpo metálico o cerámico. Este sistema de concentración puede lograr temperaturas de hasta 1200 °C, así también las torres comerciales emplean sales fundidas como almacenamiento térmico, lo que les permite extender sus horas de funcionamiento. (Palenzuela, Alarcon Padilla, & Zaragoza, 2015)

D. Concentrador de Discos parabólicos

Está formado por una disposición de espejos en una superficie parabólica, con un sistema de seguimiento solar en dos ejes, de esta manera el punto focal siempre se encuentra en el eje óptico de la parábola, punto donde se ubica un motor Stirling para producir directamente electricidad mediante un generador eléctrico. Este sistema ha demostrado una eficiencia de 32,25% para la conversión de energía solar a eléctrica. (Palenzuela, Alarcon Padilla, & Zaragoza, 2015)

Tabla 1
Características de las tecnologías de concentración solar

Características	Método de Concentración			
	Sistema de concentración Lineal		Sistema de concentración Focal	
Tipo de Campo Solar	Colector Cilindro – Parabólico	Colector Lineal Fresnel	Concentrador Solar por Torre	Concentrador de Discos parabólicos
Costo del Campo Solar (€/m2)	300-500	200-250	300-400	>350
Máxima eficiencia solar (%)	21	15	<20	31.25
Eficiencia Solar Anual (%)	10 - 16 (18 proyectado)	8 - 12 (15 proyectado)	10 - 16 (25 proyectado)	16 - 29
Requisitos de Construcción	Exigente	Simple	Exigente	Moderado
Temperatura de funcionamiento °C	350 - 415 (550 proyectado)	270 - 450 (550 proyectado)	550 - 1000	750 - 900

Nota: Fuente: Fichtner and DLR. (2011)

1.3.3 Partes principales de un Sistema Colector por Reflexión Tipo Fresnel

El Concentrador Lineal Fresnel o Linear Fresnel Reflector (LFR), se compone de un reflector, que está compuesto por varios segmentos en fila, los que concentran de manera selectiva la radiación solar en un receptor, que se eleva con una disposición paralela al eje de rotación del reflector (Figura 3). (Lovegrove & Stein, 2012)

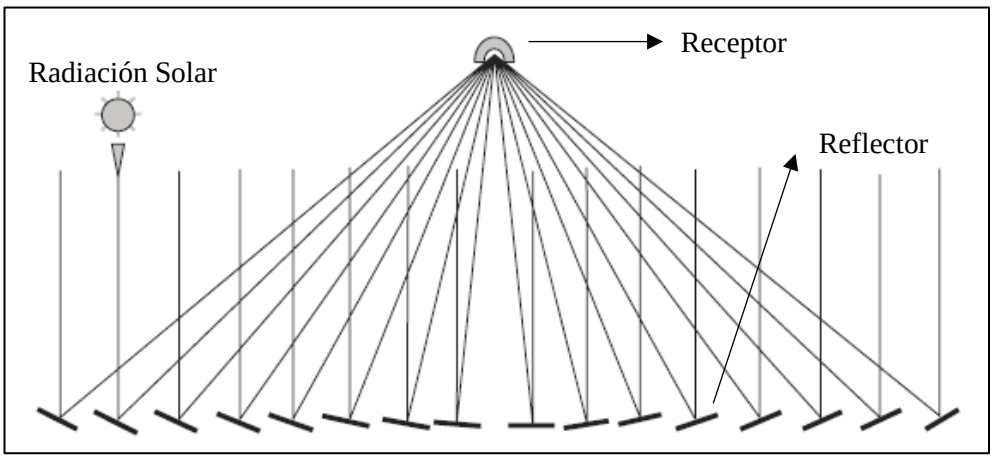


Figura 3: Configuración del Concentrador Lineal Fresnel - Vista Frontal

Fuente: (Lovegrove & Stein, 2012)

a) **Reflector o Concentrador**

Espejos: Superficie llana pulida que refleja y concentra la radiación solar en el receptor, girando de Este a Oeste siguiendo la trayectoria del sol (Figura 4).

Estructura de soporte: Ofrece de soporte para estabilidad y rotación de espejos. Debe tratarse de una geometría simple y ligera que disminuya costos en fabricación.

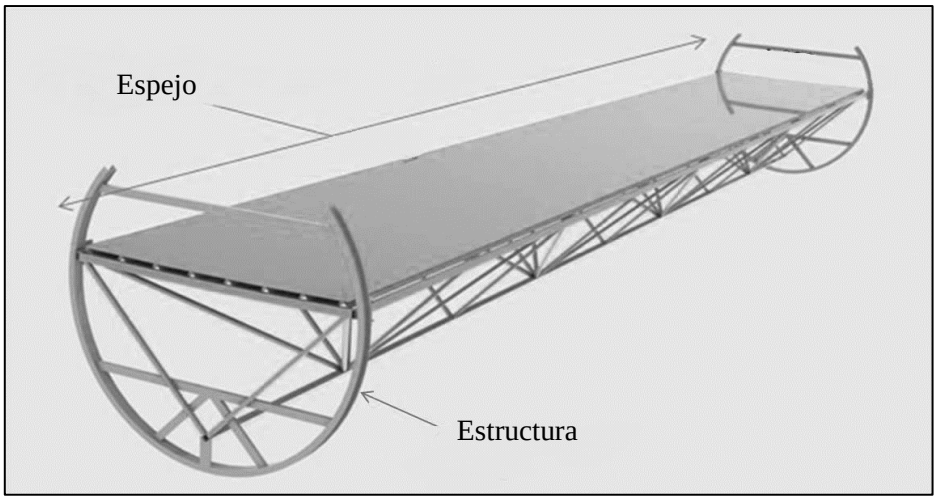


Figura 4: Espejo reflector sostenido por su estructura
Fuente: (Ministry of New & Renewable Energy of India, 2014)

Sistema de rastreo: Da movimiento al reflector en dirección del sol para recibir la máxima radiación. El ángulo de rotación se detecta al usar codificadores o interruptores de límite. Se implementa un PLC con un algoritmo que determina el azimut y la elevación del sol en función a la fecha, hora, longitud y latitud de la ubicación. Cada sistema de seguimiento está conectado al PLC, recibiendo entradas del Encoder / Limit Switch y determinará la posición de rotación del reflector. Para luego proporcionar las instrucciones de salida al accionamiento del motor, girando el reflector a la posición y dirección deseada. (Ministry of New & Renewable Energy of India, 2014)

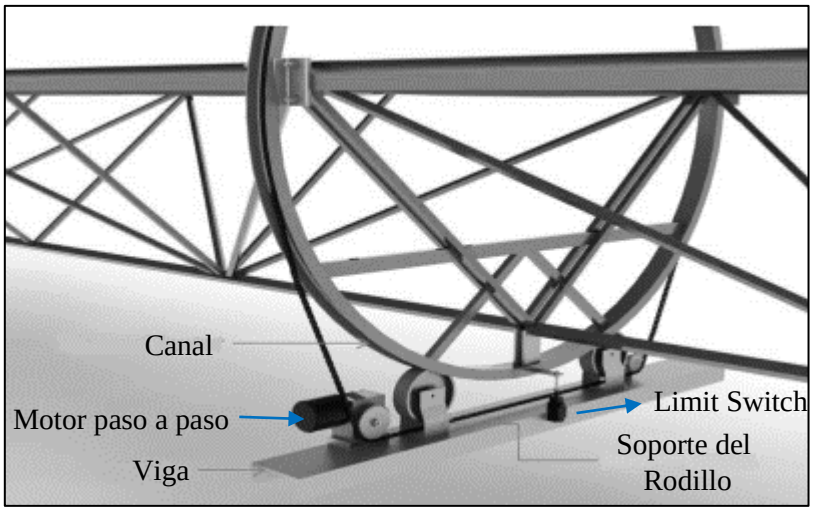


Figura 5: Sistema de seguimiento de un sistema LFR

Fuente: (Ministry of New & Renewable Energy of India, 2014)

b) Receptor

Tubo Absorbedor: Tubo donde se realiza una trasferencia de calor por radiación hacia el fluido caloportador (Figura 6). Estos tienen un recubrimiento que mejora la capacidad de absorción y una baja emisividad.

Los tubos absorbedores en plantas generadoras tipo Fresnel deben de resistir altas presiones, por producirse el vapor directamente en el tubo. Por tanto, los receptores de los concentradores cilindros parabólicos comunes no pueden usarse directamente en los concentradores Fresnel. (Günther, 2010)

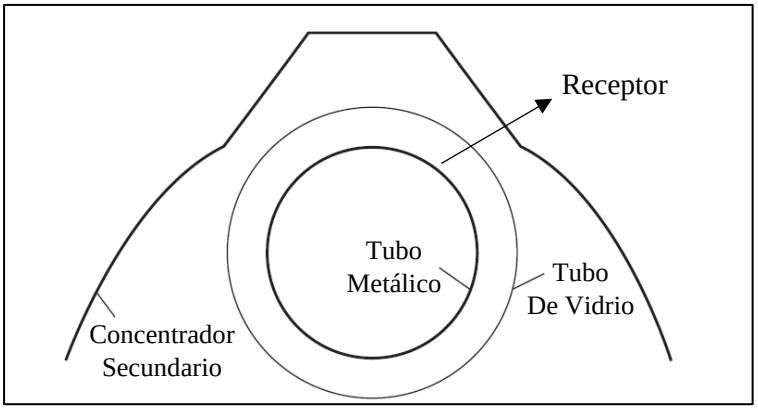


Figura 6: Configuración del Receptor

Fuente: (Lovegrove & Stein, 2012)

Concentrador Secundario: El concentrador secundario tiene una geometría parabólica cubierta de una película reflectiva, que permite mantener una línea focal nítida. Esto debido a la inexactitud óptica inevitable del colector Fresnel, por tanto, aumenta el área de absorción en el tubo sin aumentar el diámetro de este. (Günther, 2010)

Fluido Caloportador: En la generación directa se usa agua como fluido caloportador, permitiendo tener temperaturas más elevadas por no haber agrietamiento térmico del aceite térmico. Además de ser más ecológico debido a que las fugas en el sistema no implicarían un daño ambiental.

1.3.4 Principio de Funcionamiento de un Sistema LFR

Una lente Fresnel consiste en una secuencia de prismas triangulares con una pendiente diferente cada una, posicionadas en un mismo plano, haciendo que la lente fresnel sea de contextura fina. La lente Fresnel funciona como una lente difractiva, aprovechando la interferencia constructiva entre cada surco de la lente para producir un punto focal, como se aprecia en la Figura 7. (G. Driggers, 2003)

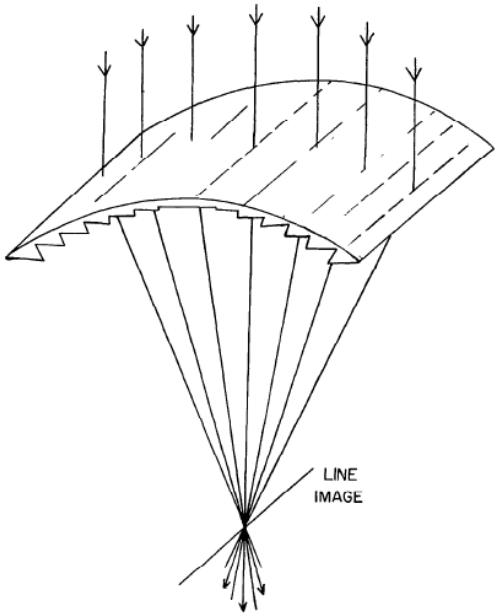


Figura 7: Lente Fresnel de base Curva

Fuente: (M. Cosby , 1977)

Por tanto, los prismas triangulares, son ahora un conjunto de espejos planos, cada uno posicionado de tal manera que la irradiación se refleja y concentra en el tubo absorbedor del receptor (Figura 8), produciéndose una transferencia de calor hacia el fluido en su interior del tubo, cada espejo es regulado por un mecanismo de seguimiento solar. (Poullikkas, 2013)

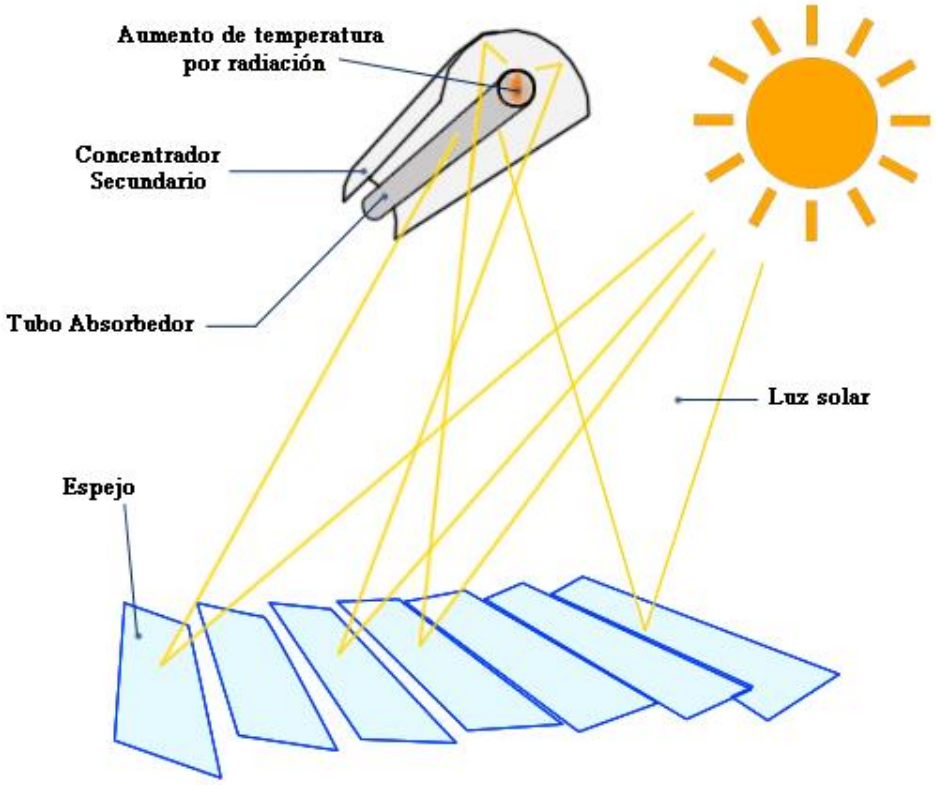


Figura 8: Principio de funcionamiento del LFR

Fuente: Propia

1.3.5 Diseño de Reflectores Lineales Fresnel

El sol emite una gran cantidad de energía en forma de radiación electromagnética, siendo ondas que transportan energía por el espacio hasta llegar a la tierra. Siendo la cantidad de radiación que ingresa a la tierra se la denomina Irradiación Solar (Ir), que se mide en W/m^2, es una cantidad que varía a lo largo del año, debido a la órbita elíptica de la tierra respecto al sol, así como su inclinación axial. En Perú se presenta entre 6.5 a 7 $kW\text{-}h/m^2$ de Insolación, (Ver Anexo 1).

La radiación puede ser Directa, por no tener ninguna interferencia al atravesar la atmosfera, y la Indirecta, la cual se encuentra dispersa debido a partículas habidos en la atmosfera, llegando a la superficie en ángulos aleatorios. (DASCOMB, 2009)

1.3.6 Diseño del Concentrador:

El diseño fundamental en un concentrador lineal tipo Fresnel abarca las dimensiones y la posición de cada uno de los espejos, así como la geometría del concentrador. Una representación geométrica para el diseño del concentrador se muestra en la Figura 9:

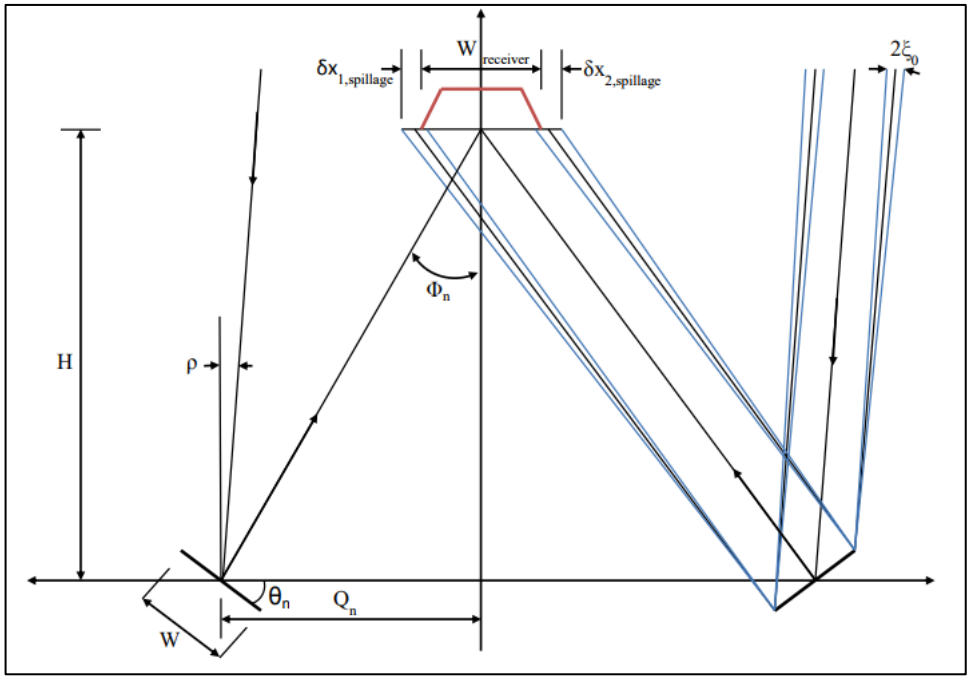


Figura 9: Diseño básico para un LFR
Fuente: (Stuart Walker, 2013)

Para cualquier espejo, los rayos solares deben incidir en el centro del espejo y reflejarlo al centro del receptor en el tubo absorbedor. Los rayos del borde entrante hacia el espejo, divergen debido al ángulo subtendido "ξ_0" del sol, los que se reflejan en la superficie horizontal hacia los costados por debajo del receptor. La concentración relativa del espejo enésimo se puede calcular mediante las coordenadas del haz de luz reflejado en comparación con la apertura del haz entrante. Tomando en cuenta las pérdidas mencionadas anteriormente. (Stuart Walker, 2013)

El ángulo de inclinación de un espejo θ_n, es una función del ángulo instantáneo del sol con la geometría de ese espejo:

$$\theta_n = \frac{\varphi_n - \rho}{2} \tag{1}$$

Siendo:

$$\varphi_n = \arctan\left(\frac{Q_n}{H}\right) \tag{2}$$

Donde:

Q_n: Posición de un espejo N

H: Altura del receptor sobre el eje de rotación de un espejo N

ρ: Angulo del sol respecto al plano Este – Oeste

φ_n: Angulo de la posición del espejo respecto al receptor

Las pérdidas por sombreado que se produce en los espejos, a una determinada hora. Esto se demuestra con análisis geométrico de estos y la inclinación de los espejos adyacentes con comparación con el anterior. El objetivo es disponer de un espaciamiento, de tal forma que el sombreado y bloqueo entre estas sea mínimo. (Stuart Walker, 2013)

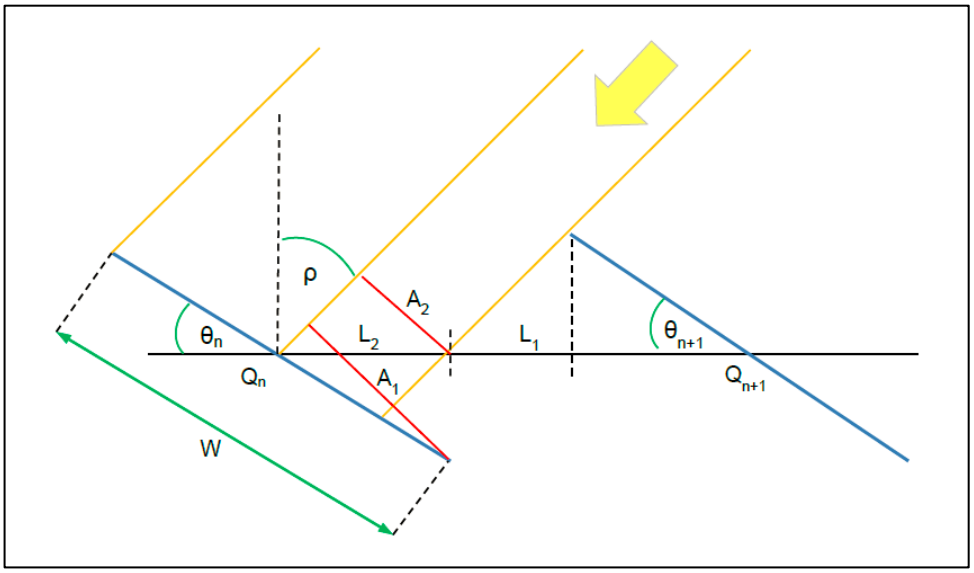


Figura 10: Diseño básico en un LFR
Fuente: (Stuart Walker, 2013)

En la Figura 10, muestra la incidencia de los rayos solares sobre los espejos, siendo el espejo n sombreado por el espejo $n+1$ que se antepone a este. El efecto sombra se produce cuando la abertura del haz solar A_2 es menor que la apertura del espejo A_1. La apertura de la mitad del espejo es:

$$A_1 = Sen(90 - \rho + \theta_n) * \frac{W}{2} \tag{3}$$

Siendo la abertura sin sombreado:

$$A_2 = L_2 * Sen(90 - \rho) \tag{4}$$

Si se toma como el origen de coordenadas justo debajo del colector y usando las posiciones de los espejos Q_n y Q_{n+1}, se puede calcular L_2:

$$L_2 = Q_n - \left(\frac{W}{2} * \cos(\theta_{n+1})\right) - L_1 - Q_{n+1} \tag{5}$$

Además de L_1:

$$L_1 = \tan(\rho) * sen(\theta_{n+1}) * \frac{W}{2} \tag{6}$$

Geometría Solar

a) **Rotación Diurna:** Es la aparente rotación del sol alrededor de la Tierra, este paso dura 24 horas y gira alrededor del eje llamado eje Celeste, a veces este difiere en 6° del eje magnético.

b) **Declinación:** Refiere al movimiento longitudinal aparente del sol sobre el cielo durante todo el año, en la siguiente figura se muestra la declinación durante el solsticio de verano en su máximo de 23.45°, a medida que la Tierra sigue su órbita, la declinación caerá a un mínimo de -23.45. (DASCOMB, 2009)

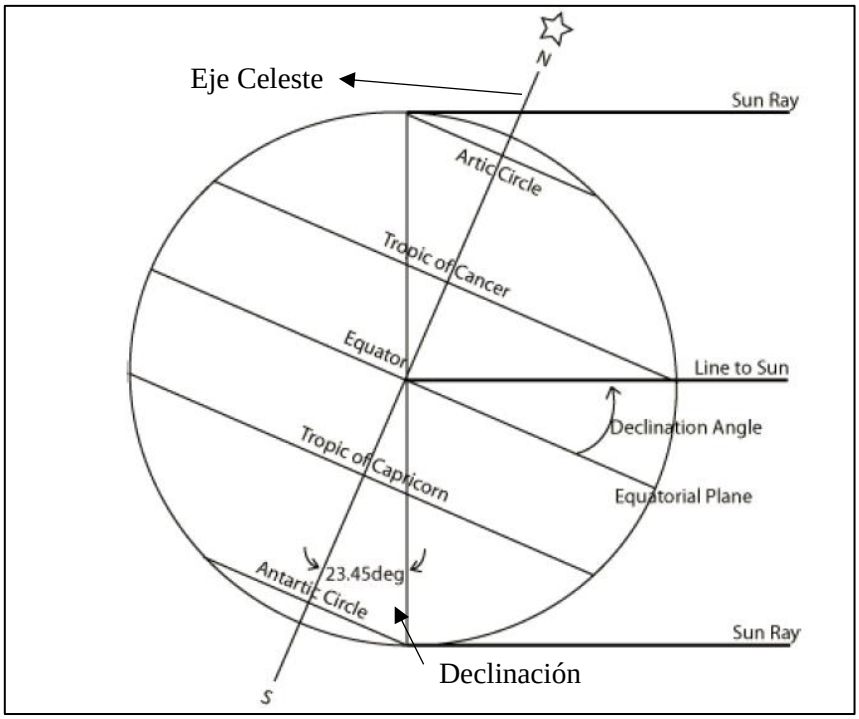


Figura 11: Angulo de declinación del solsticio de verano

Fuente: (DASCOMB, 2009)

c) **Tiempo Solar:** Cuando la tierra se aleja del sol siguiendo su trayectoria elíptica, se tarda en girar para ver el sol en la misma posición (Figura 12).

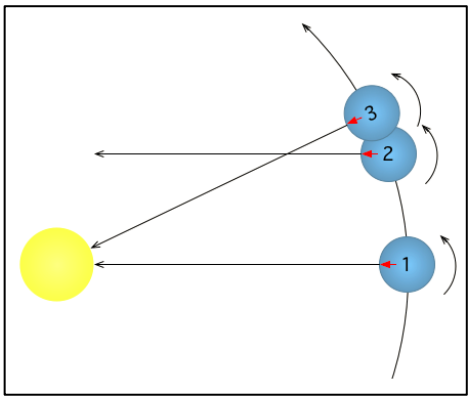


Figura 12: Tiempo sidéreo

Fuente: (DASCOMB, 2009)

La variación del tiempo solar medio con el aparente, durante un periodo anual de 365 días, resulta en la ecuación del tiempo (Figura 13). Este efecto cambia la posición del sol en ± 4° durante el periodo anual, dato que debe tenerse en cuenta al calcular la posición del sol.

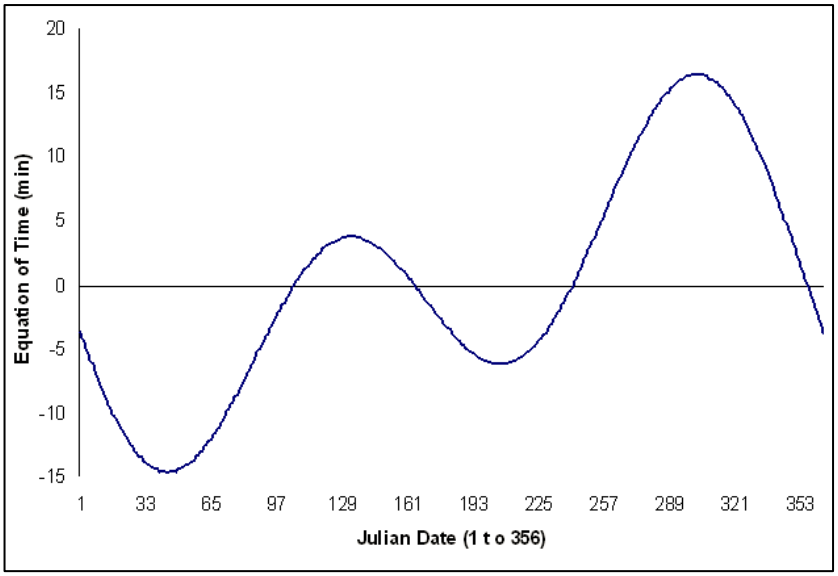


Figura 13: Ecuación del Tiempo

Fuente: (DASCOMB, 2009)

Otros factores que afectan la posición del sol son la refracción y la dispersión que son causadas por la luz que atraviesa la atmosfera. Este efecto puede hacer que la posición real difiera de la aparente, con una diferencia de hasta 34 minutos.

d) Sistema de Coordenadas Celestes:

Se necesitan de dos ángulos para denotar la posición de una estrella, cada sistema toma un eje y plano diferente que describe la ubicación de los objetos en el espacio usando dos coordenadas, coordenadas Horizontal y Ecuatorial.

Coordenadas Horizontales: Se refieren al horizonte y vertical de un cuerpo, desde un plano horizontal. El ángulo "α" representa la altitud y el ángulo que tiene un cuerpo en un plano horizontal respecto a un punto cardinal, se representa por "γ", siendo "γ_s" positivo. Con estos dos ángulos se puede encontrar la dirección normal del Sol. (DASCOMB, 2009)

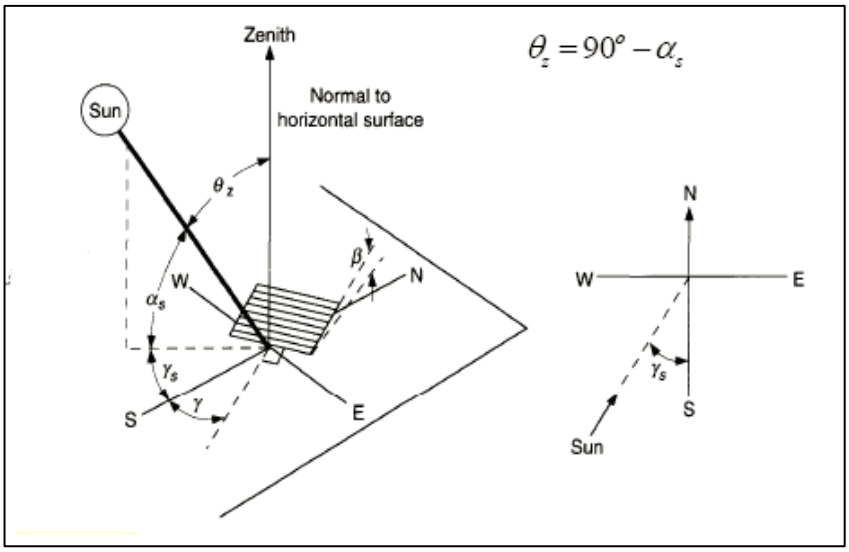


Figura 14: Sistema de Coordenadas Horizontales
Fuente: (DASCOMB, 2009)

Ecuación de tiempo

Debido a factores asociados a la órbita de la tierra alrededor del sol, la velocidad de la tierra varia a lo largo del año, esto causa una variación en la hora del día, pues generalmente el medio día solar no coincide con las 12:00 en punto de una locación. La esta variación se puede determinar con la ecuación de tiempo (ET) y sus valores en función del día del año se puede obtener de manera aproximada con la ecuación 7.

$$ET = 9.87sin(2B) - 7.53cos(B) - 1.5sin(B) \quad (7)$$

$$B = (N - 81)(360/364) \quad (8)$$

Corrección en la Longitud

La hora estándar del reloj se calcula desde un meridiano seleccionado cerca del centro de una zona horaria o desde el meridiano estándar, el Greenwich, que tiene una longitud de 0. Como el sol tarda 4 minutos en atravesar 1° de longitud, se debe sumar o restar un término de corrección de longitud de 4 (Longitud estándar [SL] Longitud local [LL]) a la hora estándar de la localidad. La ecuación general para calcular el AST es:

$$AST = LST + \frac{ET+4(SL-LL)-DS}{60} \quad (9)$$

Donde:

AST: Tiempo solar aparente al oeste (W) del meridiano de Greenwich, (hr)

LST: Tiempo estándar local, (hr)

ET: Ecuación de tiempo, (min)

SL: Longitud estándar, (°)

LL: Longitud Local, (°)

DS: Horario de verano, (min)

Ángulos solares

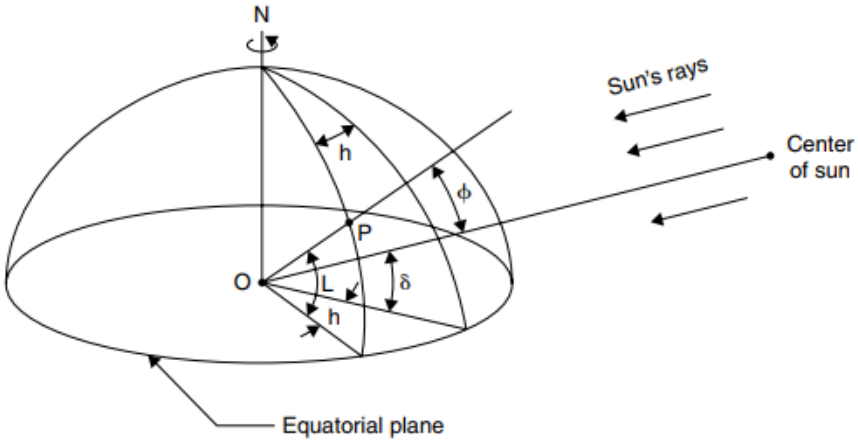


Figura 15: Definición de latitud, ángulo horario y declinación solar
Fuente: Kalogirou, S. A. (2014)

Declinación, (δ)

La declinación solar es la distancia angular de los rayos del sol al norte (o sur) del ecuador. Como se muestra en la Figura 15, es el ángulo entre la línea central sol-tierra y la proyección de esta línea en el plano ecuatorial. Las declinaciones al norte del ecuador (verano en el hemisferio norte) son positivas, y las del sur son negativas. La declinación, δ, en grados para

cualquier día del año (N) se puede calcular aproximadamente por la ecuación (ASHRAE, 2007):

$$\delta = 23.45 \sin\left(\frac{360}{365}(284 + N)\right) \tag{10}$$

Angulo horario, $(\boldsymbol{h})$

El ángulo horario h, de un punto en la superficie de la tierra se define como el ángulo a través del cual la tierra se giraría para llevar el meridiano del punto directamente debajo del sol. La Figura 15 muestra el ángulo horario del punto P como el ángulo medido en el plano ecuatorial de la Tierra entre la proyección de OP y la proyección de la línea de centro a centro del Sol-Tierra. El ángulo horario al mediodía solar local es cero. Expresado simbólicamente, el ángulo horario en grados es:

$$h = (AST - 12)15 \tag{11}$$

Angulo de altitud solar, $(\boldsymbol{\alpha})$

El ángulo de altitud solar es el ángulo entre los rayos del sol y un plano horizontal, como se muestra en la Figura 16. Está relacionado con el ángulo cenital solar, Φ, que es el ángulo entre los rayos del sol y la normal al plano. Por lo tanto:

$$\Phi + \alpha = \frac{\pi}{2} = 90° \tag{12}$$

La expresión matemática ángulo de altitud solar es:

$$\sin(\alpha) = \cos(\Phi) = \sin(L)\sin(\delta) + \cos(L)\cos(\delta)\cos(h) \tag{13}$$

Donde:

L: Latitud local

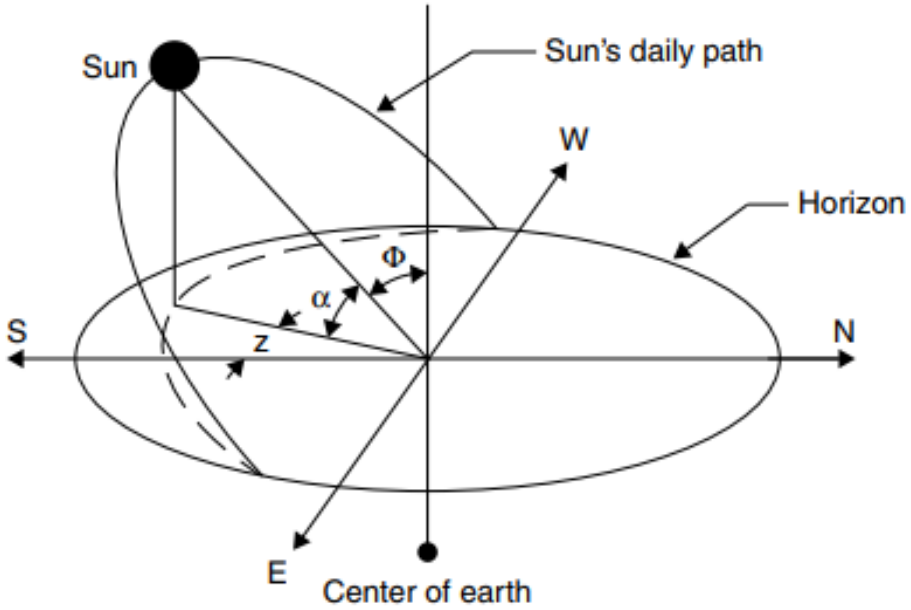


Figura 16: Trayectoria aparente del sol a través del cielo desde el amanecer
Fuente: Kalogirou, S. A. (2014)

Angulo azimutal solar, (z)

El ángulo azimutal solar, z, es el ángulo de los rayos del sol medidos en el plano horizontal desde el sur (verdadero sur) para el hemisferio norte o el norte para el hemisferio sur; hacia el oeste se designa como positivo. La expresión matemática para el ángulo de azimutal solar es:

$$\sin(z) = \frac{\cos(\delta)\sin(h)}{\cos(\alpha)} \tag{14}$$

Duración del día (L_{dia})

Como el sol cambia su posición durante todo el año, debido a su movimiento existen días de mayor o menor duración. La duración del día se mide en horas desde el amanecer hasta la puesta del sol y varía dependiendo de la latitud de la locación. Para obtener la duración del día se emplea la ecuación 15.

$$L_{dia} = \left(\frac{2}{15}\right)\cos^{-1}[-\tan(L)\tan(\delta)] \tag{15}$$

Angulo de Incidencia, $(\boldsymbol{\theta})$

El ángulo de incidencia solar, θ, es el ángulo entre los rayos del sol y lo normal en una superficie. Los ángulos que se muestran en la Figura 15 están relacionados con los ángulos básicos, que se muestran en la Figura 16, con la siguiente expresión general para el ángulo de incidencia:

$$\cos(\theta) = \sin(L)\sin(\delta)\cos(\beta) - \cos(L)\sin(\delta)\sin(\beta)\cos(Z_s) + \cos(L)\cos(\delta)\cos(h)\cos(\beta) + \sin(L)\cos(\delta)\cos(h)\sin(\beta)\cos(Z_s) + \cos(\delta)\sin(h)\sin(\beta)\sin(Z_s) \quad (16)$$

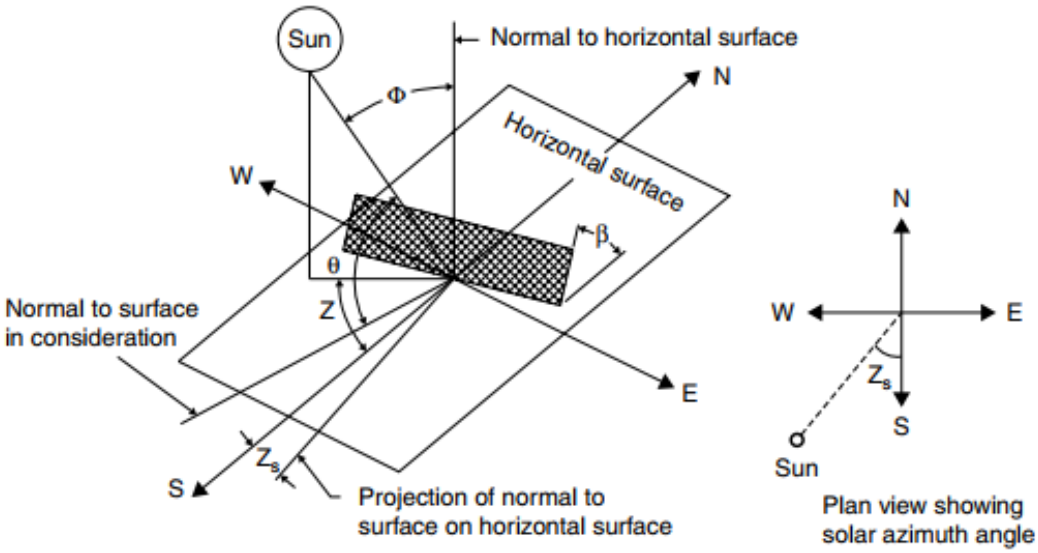


Figura 17: Diagrama de ángulos solares.
Fuente: Kalogirou, S. A. (2014)

Donde:

β: Angulo de inclinación de la superficie desde la horizontal

Z_s: Angulo azimutal de la superficie

Sistema de seguimiento

Para los sistemas LFR se requiere que el método de seguimiento solar ubique los espejos a lo largo del eje Sur-Norte (S-N) permitiendo que la rotación de los mismos sea únicamente de Este a Oeste (E-W). Esto permite el control de un solo eje simplificando el diseño del sistema. El control en un solo eje tiene un menor rendimiento comparado con el seguimiento en dos ejes, pero para los sistemas LFR el control de dos ejes menos adecuado para su implementación. Para este sistema el ángulo de incidencia se pude calcular con la ecuación 17 o 18.

$$\cos(\theta) = \sqrt{\sin^2(\alpha) + \cos^2(\delta)\sin^2(h)} \tag{17}$$

$$\cos(\theta) = \cos(\Phi)\cos(h) + \cos(\delta)\sin^2(h) \tag{18}$$

Mientras que el ángulo de inclinación se calcula con la ecuación siguiente:

$$\tan(\beta) = \tan(\Phi)\,|\cos(Z_s - z)| \tag{19}$$

El ángulo azimutal de la superficie inclinada (Z_s) es 90º o -90º, dependiendo del ángulo azimutal solar z:

$$Si:\ z > 0°, \qquad Z_s = 90°$$

$$Si:\ z < 0°, \qquad Z_s = -90°$$

Placas transparentes

Cuando un haz de radiación incide en la superficie de una placa transparente en el ángulo θ_1, llamado ángulo de incidencia, como se muestra en la Figura 18, parte de la radiación incidente se refleja y el resto se refracta, o se dobla, al ángulo θ_2, llamado ángulo de refracción, a medida que pasa a través de la interfaz. El ángulo θ_1, también es igual al ángulo en el que el haz se refleja especularmente desde la superficie.

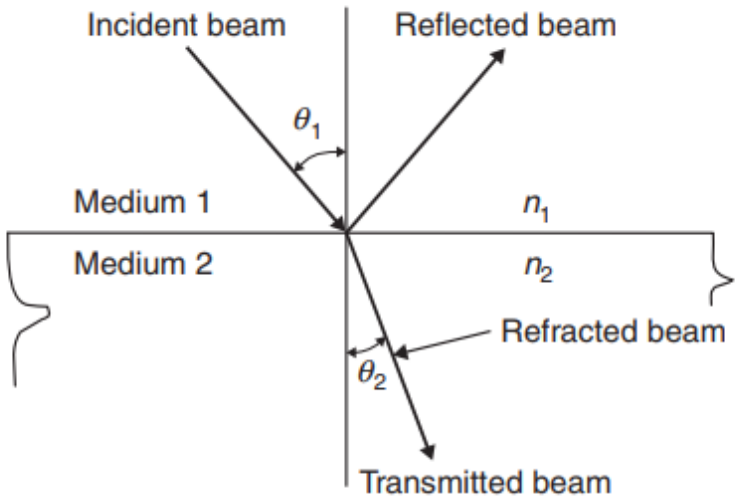


Figura 18: Ángulos incidente y de refracción para un haz de luz.
Fuente: Kalogirou, S. A. (2014)

Los dos ángulos están relacionados por la ley de Snell:

$$n = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin(\theta_1)}{\sin(\theta_2)} \tag{20}$$

Para el vidrio el índice de refracción típico es:

$$n = 1.526$$

Fresnel derivó las expresiones para componentes perpendiculares y paralelos de radiación para superficies lisas como:

$$r_{\perp} = \frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_1)}{\sin^2(\theta_2 + \theta_1)} \tag{21}$$

$$r_{\parallel} = \frac{\tan^2(\theta_2 - \theta_1)}{\tan^2(\theta_2 + \theta_1)} \tag{22}$$

La transmitancia, τ_a (subíndice α indica que solo se consideran las pérdidas de absorción), puede calcularse a partir de:

$$\tau_\alpha = e^{\left(-\frac{KL}{\cos(\theta_2)}\right)} \tag{23}$$

Donde:

K: Coeficiente de extinción, [m^{-1}]

L: Espesor de la cubierta de vidrio, [m]

De manera similar, la transmitancia, τ_r (el subíndice r indica que solo se consideran las pérdidas de reflexión), se puede calcular a partir de la transmitancia promedio de los dos componentes de la siguiente manera:

$$\tau_r = \frac{1}{2}\left(\frac{1-r_{\parallel}}{1+r_{\parallel}} + \frac{1-r_{\perp}}{1+r_{\perp}}\right) \tag{24}$$

Dado que, para las cubiertas prácticas de colector, τ_α rara vez es inferior a 0.9 y r es del orden de 0.1, la transmitancia de una sola cubierta se convierte en:

$$\tau \cong \tau_\alpha \tau_r \tag{25}$$

Radiación Solar absorbida

La energía solar incidente en una superficie inclinada se puede encontrar conociendo la posición del sol mediante las ecuaciones desarrolladas hasta ahora. En términos generales la radiación incidente tiene tres componentes especiales: la radiación directa (haz), la radiación difusa y la reflejada en el suelo. Para determinar es valor de la radiación los cálculos dependen del modelo de radiación empleado.

Cuando las mediciones de la radiación solar incidente (Gt) están disponibles, se puede usar la siguiente relación:

$$S = G_t\,(\tau\alpha)_{av} \tag{26}$$

De donde se requiere el valor promedio $(\tau\alpha)_{av}$ el cual se determina con las ecuaciones 27 o 28:

$$(\tau\alpha)_{av} \cong 0.96(\tau\alpha)_B \tag{27}$$

$$(\tau\alpha)_B = 1.01\tau\left(\frac{a}{a_n}\right)a_n \tag{28}$$

$$\frac{a}{a_n} = 1 + (2.0345 \times 10^{-3}\theta) - (1.99 \times 10^{-4}\theta^2) + (5.324 \times 10^{-6}\theta^3) - (4.799 \times 10^{-8}\theta^4) \tag{29}$$

Donde:

G_t: Radiación solar promedio del sol, [W/m2]

S: Radiación solar absorbida por el colector [W/m2]

τ: Transmitancia para una cubierta única, [Adim]

$\frac{a}{a_n}$: Absortancia dependiente del ángulo, [Adim]

1.3.6.1 Perdidas de energía en el colector

Cuando una cierta cantidad de radiación solar cae sobre la superficie de un colector (receptor), la mayor parte se absorbe y se envía al fluido de transporte, y se transporta como energía útil. Sin embargo, como en todos los sistemas térmicos, las pérdidas de calor al medio ambiente por diversos modos de transferencia de calor son inevitables. Para determinar las pérdidas de calor desde el receptor se empleará el coeficiente de transferencia de calor por perdidas U_L el cual está basado en el área del receptor. De manera simplificada, las diversas pérdidas térmicas del colector se pueden combinar en una resistencia simple, R_L, como se muestra en la Figura 19, para que las pérdidas de energía del colector se puedan escribir como:

$$Q_{loss} = \frac{T_p - T_a}{R_L} = U_L A_r (T_r - T_a) \tag{30}$$

Donde:

Q_{loss}: Perdidas de calor, (W)

A_r: Área superficial del recibidor, (m^2)

U_L: Coeficiente global de pérdida de calor, (W/m^2 K)

R_L: Resistencia térmica, (m^2 K/W)

T_r: Temperatura del receptor, (K)

T_a: Temperatura ambiente, (K)

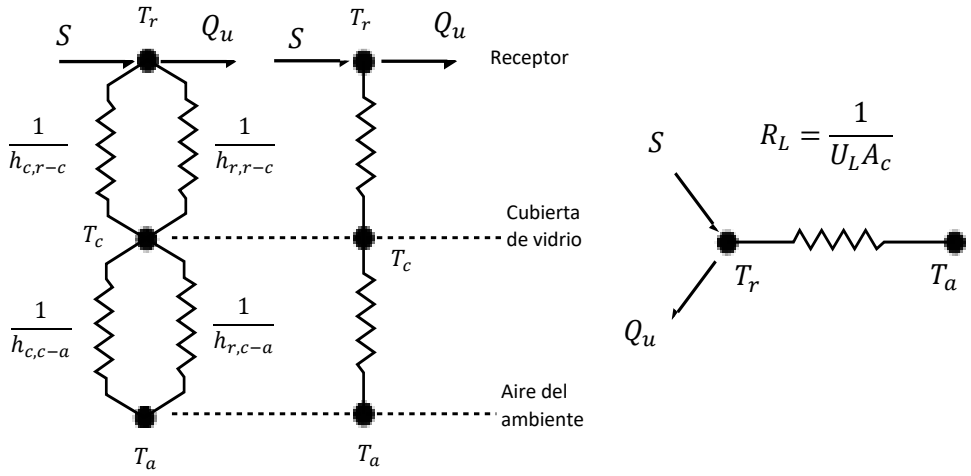


Figura 19: Radiación de entrada y perdidas de calor en un receptor cilíndrico.

Fuente: Elaboración Propia

Para un receptor tubular con una cubierta cilíndrica concéntrica alrededor del receptor al cual se le ha evacuado el aire entre ambos y en cuyo caso las perdidas por convección entre el tubo receptor y la cubierta se vuelven insignificantes, el coeficiente global de perdidas es U_L viene dado por:

$$U_L = \left[\frac{A_r}{(h_w + h_{r,c-a})A_c} + \frac{1}{h_{r,r-c}}\right]^{-1} \tag{31}$$

Donde:

U_L: Coeficiente global de pérdidas de calor, (W/m^2 K)

h_w: Coef. de transferencia de calor perdido por el viento, (W/m^2 K)

$h_{r,c-a}$: Coef. de transferencia de calor por radiación de la cubierta hacia el ambiente, (W/m^2 K)

$h_{r,r-c}$: Coef. de transferencia de calor por convección desde el receptor hacia la cubierta, (W/m^2 K)

A_r: Área superficial del receptor, (m^2)

A_c: Área superficial de la cubierta de vidrio, (m^2)

El coeficiente de transferencia de calor por radiación desde el receptor cilíndrico hacia la cubierta de vidrio y de la cubierta hacia el medio ambiente se pueden obtener con las ecuaciones 32 y 33 respectivamente:

$$h_{r,r-c} = \frac{\sigma(T_r+T_c)(T_r^2+T_c^2)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_r}\right)+\left(\frac{A_r}{A_c}\right)\left(\frac{1}{\varepsilon_c}-1\right)} \tag{32}$$

$$h_{r,c-a} = 4\sigma\varepsilon_c T_c^3 \tag{33}$$

Donde:

T_r: Temperatura del absorbedor, (°C)

T_c: Temperatura de la cubierta de vidrio, (°C)

σ: Constante de Stefan-Boltzmann, (W/m^2 K^4)

ε_r: Emisividad infrarroja del receptor, (Adim)

ε_c: Emisividad infrarroja de la cubierta de vidrio, (Adim)

Debido a que el aire entre la cubierta de vidrio y el tubo receptor es evacuado el coeficiente de transferencia de calor por convección es ignorado, a diferencia del coeficiente de transferencia entre la cubierta de vidrio y el medio ambiente el cual depende de las propiedades del aire. Para determinar el coeficiente de transferencia de calor por convección se emplea la ecuación 34 para valores del número de Reynols entre 0.1 – 1000, mientras que la ecuación 35 es para valores entre 1000 – 50000.

Para 0.1< Re < 1000

$$Nu = 0.4 + 0.54(Re)^{0.52} \tag{34}$$

Para 1000< Re < 50000

$$Nu = 0.3(Re)^{0.6} \tag{35}$$

$$Re = \frac{\rho V D_c}{\mu} \tag{36}$$

El coeficiente de transferencia de calor por convección para la cubierta de vidrio es entonces:

$$h_{c,c-a} = h_w = \frac{Nu\, k_f}{D_c} \tag{37}$$

Donde:

Nu: Numero de Nusselt

Re: Numero de Reynolds

ρ: Densidad del fluido, (kg/m^3)

V: Velocidad del fluido, (m/s)

D_i: Diámetro interno de la tubería, (m)

μ: Viscosidad del fluido, (kg/m s)

k_f: Conductividad térmica del fluido, (W/m K)

D_c: Diámetro de la cubierta de vidrio, (m)

Para poder obtener los valores de los coeficientes de transferencia de calor es necesario conocer la temperatura de la cubierta de vidrio, la cual será obtenida por iteración iniciando con un valor cercano a la temperatura del medio ambiente y luego calculando los coeficientes de transferencia de calor por radiación. Aplicando la ecuación 38 se verifica si la temperatura obtenida es igual a la asumida, en caso contrario se inicia otra iteración.

$$T_c = \frac{A_r h_{r,r-c} T_r + A_c\left(h_{r,c-a} + h_w\right) T_a}{A_r h_{r,r-c} + A_c\left(h_{r,c-a} + h_w\right)} \tag{38}$$

Incluyendo la trasferencia de calor desde la superficie del tubo receptor hacia el fluido y junto con las pérdidas de calor se puede expresar el coeficiente global de trasferencia de calor

$$U_0 = \left[\frac{1}{U_L} + \frac{D_0}{h_{fi} D_i} + \frac{D_0 \ln(D_0/D_i)}{2k}\right]^{-1} \tag{39}$$

Donde:

U_0: Coeficiente global de transferencia de calor, (W/m^2 K)

D_0: Diámetro exterior del tubo receptor, (m)

D_i: Diámetro interior del tubo receptor, (m)

h_{fi}: Coeficiente de transferencia de calor por convección dentro del tubo, (W/m^2 K)

k: Conductividad térmica del tubo, (W/m K)

El coeficiente de transferencia de calor por convección dentro del tubo puede ser obtenido por medio de numero de Nusselt (Nu) con las ecuaciones siguientes:

$$h_{fi} = \frac{Nu\, k_{fi}}{Di} \tag{40}$$

Para flujo turbulento Re > 2300

$$Nu = 0.023(Re)^{0.8}(Pr)^{0.4} \tag{41}$$

Para flujo laminar Re < 2300

$$Nu = 4.364 \tag{42}$$

$$Pr = \frac{C_p \mu}{k_{fi}} \tag{43}$$

Donde:

Re: Numero de Reynlods

Pr: Numero de Prandtl

k_{fi}: Conductividad térmica del fluido dentro del receptor, (W/m K)

1.3.6.2 Energía útil absorbida

Para un concentrador en estado estacionario, la tasa de calor útil suministrada es igual a la tasa de energía de radiación solar absorbida por el fluido $G_t(\tau\alpha)$ menos las pérdidas de calor directas o indirectas desde la superficie hacia los alrededores por conducción, convección y radiación representada por el producto del coeficiente global de pérdida de calor (U_L), multiplicado por la diferencia entre la temperatura del receptor, (T_r) y la temperatura ambiente (T_a), como se puede ver en la Figura 20.

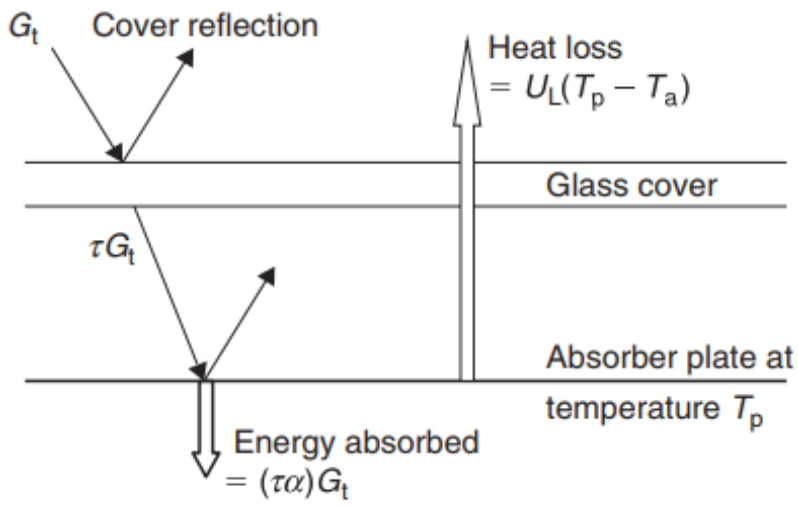


Figura 20: Radiación de entrada y perdidas de calor en un colector.

Fuente: Kalogirou, S. A. (2013)

Un concentrador es capaz de aprovechar principalmente la radiación directa G_B, por lo tanto, en estado estable, la tasa de energía útil recolectada de un receptor cilíndrico de área A_r con un concentrador de área A_a se puede obtener de:

$$Q_u = G_B\eta_0 A_a - A_r U_L(T_r - T_a) = \dot{m}c_p[T_0 - T_i] \tag{44}$$

Donde:

Q_u: Calor útil del colector, (W)

A_r: Área superficial del receptor cilíndrico, (m^2)

A_a: Área superficial de radiación solar absorbida por el concentrador, (m^2)

G_B: Irradiancia directa (haz) sobre una superficie inclinada (W/m^2)

U_L: Coeficiente global de pérdida de calor, (W/m^2 K)

T_r: Temperatura superficial del receptor, (K)

T_a: Temperatura ambiente, (K)

$\dot{m}$: Flujo masico del agua, (kg/s)

c_p: Calor especifico del agua presión constante, (KJ/K.kg)

T_0: Temperatura de salida del agua, (K)

T_i: Temperatura de entrada del agua, (K)

Dividiendo la energía útil entre la longitud del receptor la ganancia de energía útil por unidad de longitud, es:

$$q'_u = \frac{Q_u}{L} = \frac{A_a \eta_0 G_B}{L} - \frac{A_r U_L}{L}(T_r - T_a) \tag{45}$$

Donde:

q'_u: Flujo de calor útil por unidad de longitud, (W/m)

L: Longitud del receptor cilíndrico, (m)

Escribiendo la energía transferida en términos de la temperatura local del fluido T_f, se tiene:

$$q'_u = \frac{\left(\frac{A_r}{L}\right)(T_r - T_f)}{\frac{D_0}{h_{fi} D_i} + \left(\frac{D_0}{2K}\ln\left(\frac{D_0}{D_i}\right)\right)} \tag{46}$$

Eliminando T_r desde las ecuaciones 45 y 46, se puede reescribir la ecuación para el calor útil.

$$q'_u = \frac{F' A_a}{L}\left[G_B \eta_0 - \frac{U_L}{C}(T_r - T_a)\right] \tag{47}$$

La relación entre el factor de transferencia de calor global entre el coeficiente de perdidas es llamado Factor de eficiencia del colector, y se calcula con la ecuación 48.

$$F' = \frac{1/U_L}{\frac{1}{U_L}+\frac{D_0}{h_{fi}D_i}+\left(\frac{D_0}{2k_{tub}}\ln\left(\frac{D_0}{D_i}\right)\right)} = \frac{U_0}{U_L} \tag{48}$$

Donde:

k_{tub}: Conductividad térmica de la tubería

Con la ecuación 48 se puede escribir otro parámetro importante denominado: Factor de eliminación de calor, el cual está definido como:

$$F_R = \frac{\dot{m}\,cp}{A_r U_L}\left[1 - \exp\left(-\frac{U_L F' A_r}{\dot{m}\,cp}\right)\right] \tag{49}$$

Empleando el factor de remoción de calor F_R la ecuación 44, se puede escribir en términos de la temperatura de entrada del agua.

$$Q_u = F_R[G_B\eta_0 A_a - A_r U_L(T_i - T_a)] \tag{50}$$

La eficiencia del colector se puede obtener dividiendo Q_u entre $(G_B A_a)$

$$\eta = F_R\left[\eta_0 - U_L\left(\frac{T_i - T_a}{G_B C}\right)\right] \tag{51}$$

1.3.6.3 Colectores concentradores

Los colectores de concentración emplean un dispositivo óptico entre la fuente de radiación (el sol) y la superficie de absorción de energía (el colector). Por tal razón, se requiere un análisis óptico y térmico. Un parámetro importante para caracterizar estos sistemas es la relación de concentración que se define como:

$$C = \frac{A_a}{A_r} \tag{52}$$

Donde:

C: Relación de concentración, (Adim)

A_a: Área de apertura del concentrador, (m^2)

A_r: Área del recibidor, (m^2)

Para concentradores el valor de C siempre es mayor que uno. Considerando que el colector solar tipo Fresnel concentran los rayos del sol sobre la superficie tubular del colector.

1.3.6.4 Calentamiento de fluido

La energía liberada hacia el fluido y que causa el calentamiento del mismo se modela con el balance energético de la Figura 21, donde la energía útil que se transfiere por las paredes de la tubería se encarga de elevar la temperatura del fluido mientras se desplaza en sentido unidireccional.

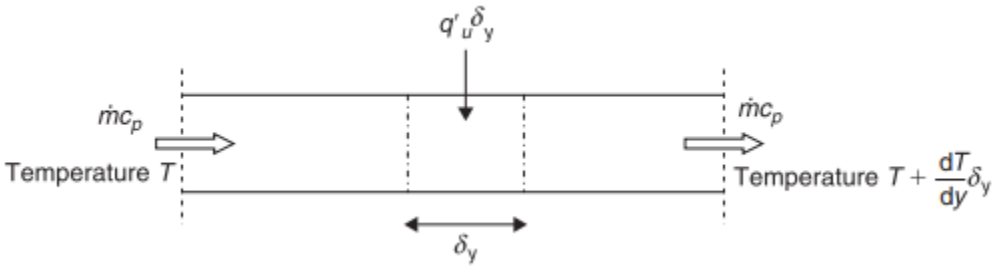


Figura 21: Flujo de energía a través de un elemento del tubo.

Fuente: Kalogirou, S. A. (2014)

Por lo general, es deseable expresar la ganancia de energía útil total del colector en términos de la temperatura de entrada del fluido. Para hacer esto, se debe utilizar el factor de eliminación de calor del colector F_R. El factor de eliminación de calor representa la proporción de la ganancia de energía útil real que resultaría si la superficie de absorción del colector hubiera estado a la temperatura local del fluido, como se aprecia en la ecuación 49.

Empleando las ecuaciones 44 y 50 se obtiene la temperatura de salida del agua con la ecuación 53.

$$T_0 = T_i + \frac{Q_u}{\dot{m}c_p} \tag{53}$$

1.3.7 Definición de términos

Radiación de haz ($\bar{B}$): También llamado radiación directa, es flujo solar (tasa de energía por unidad de área).

Radiación difusa ($\bar{D}$): El flujo solar disperso por diversos mecanismos de dispersión en la cúpula del cielo sin un ángulo de incidencia específico en una superficie terrestre.

Radiación total ($\bar{H}$): Es la radiación directa y difusa.

Emisividad: es una propiedad material que describe la tasa de radiación emitida por una superficie.

Encoder: dispositivo que convierte un movimiento en una señal digital, que luego es analizada por un PLC, puede contar los grados que se girados por un motor de paso, velocidad, etc.

Dispersión: es una descomposición de las ondas de luz al atravesar el medio por el que se propaga.

Irradiación: denomina a la energía por una unidad de superficie, sus unidades son (J/m^2).

Irradiancia: mide la potencia de la radiación solar que incide sobre la superficie terrestre, sus unidades son (W/m^2).

PLC: por sus siglas se denomina, controlador lógico programable, el cual se aplica en la automatización de procesos.

Radiación Solar: denomina a la energía emitida por el sol en forma de ondas que forman un campo electromagnético.

Refracción: es el cambio en la dirección de un rayo solar al cambiar el medio por el cual atraviesa.

Solsticio: denomina a una aparente máxima altura del sol, respecto al plano terrestre, con un máximo tiempo de duración para el día o la noche.

1.3.8 Software de diseño

a) Matlab

Matlab es un software desarrollado por Eispack y Linpack. Siendo capaz de desarrollar modelos matemáticos, debido a su lenguaje de scripting integrado y enormes bibliotecas de funciones matemáticas basadas en el cálculo matricial.

Posee alrededor de 150 cajas de herramientas que cubren diversos tipos de aplicaciones, como análisis de datos, visualización, cálculos financieros, estadísticas, lógica difusa, etc. Así mismo cuenta con un entorno grafico denominado Simulink, para diseño y simulaciones, cimentado en modelos de sistemas multidominio dinámico e integrado.

La caja de herramientas es distribuida por la firma estadounidense MathWorks, los cuales están organizados en una biblioteca grafica que incluye componentes básicos como funciones matemáticas, generadores de señal y visualización como la salida de archivos.

Todas las operaciones se realizan en la interfaz gráfica, estando los componentes conectados por las operaciones a una interfaz distinta. Así también los parámetros de simulación ejecutados en el espacio de trabajo de Matlab, permite una automatización de diferentes simulaciones con diferentes conjuntos de parámetros según sea necesario, para los algoritmos de optimización. (CarstenWemhöner)

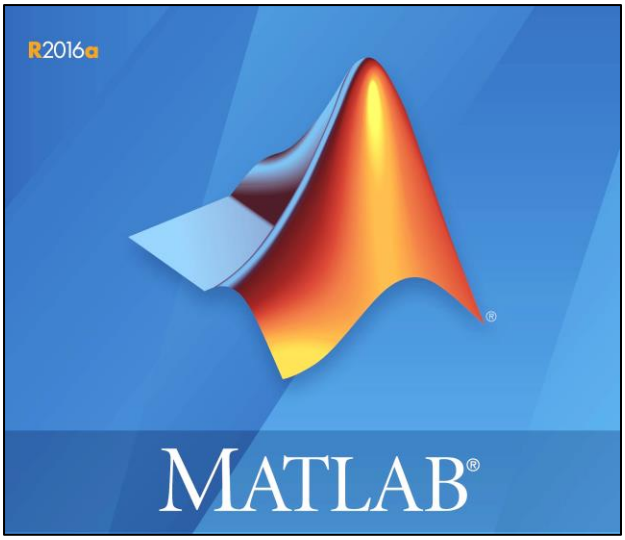


Figura 22: Logo del Software Matlab
Fuente: (Gamax Laboratory Solutions Ltd, 2019)

b) Solidworks

SolidWorks es un software que permite el diseño asistido por computadora, pudiendo realizar un análisis geométrico en 3D, fue de desarrollado por SolidWorks Corp.

Figura 23: Logo del Software SolidWorks.
Fuente: (Wikiwand, 2019)

Posee una interfaz de diseño intuitivo y el software integrado trabajan de manera conjunta para ofrecerle la libertad de centrarse en la innovación. Puede maximizar la eficacia del diseño y sus recursos para obtener productos mejores y más rentables de forma más rápida. Cuenta con diversos paquetes que mejoran la calidad del diseño, el paquete de SolidWorks Simulation, permite configurar entornos virtuales con el objetivo para probar los diseños de los productos antes de elaborarlos. Realiza pruebas con una amplia diversidad de parámetros (durabilidad, fatiga y estática, movimiento del ensamblaje, transferencia de calor, dinámica de fluidos). Los usuarios utilizan fundamentalmente la simulación estructural para determinar la resistencia y rigidez de un producto mediante el registro de las deformaciones y tensiones de los componentes. (Systemes, s.f.)

1.4 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cuál será la geometría y especificaciones técnicas del colector solar lineal que permita producir vapor de agua a una temperatura de 100°C para la autoclave de la planta piloto de la USS?

1.5 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DEL ESTUDIO.

Justificación Técnica

El proyecto de investigación contribuye al desarrollo e investigación de nuevos dispositivos con tecnología diferente a la convencional para la producción de vapor, en la comunidad estudiantil de la escuela de ingeniería mecánica eléctrica.

Justificación Económica

En un sistema hibrido para la generación de vapor donde el colector solar forma parte del proceso, garantiza una reducción en los costos asumidos por el caldero para los procesos de la planta.

Justificación Ambiental

El uso de combustibles fósiles ha sido tema de preocupación debido al daño generado al medio ambiente, por ende, el desarrollo de nuevas tecnologías sostenibles como la energía solar contribuyen a un ambiente más saludable.

Justificación Social

El uso de tecnologías sostenibles como es el colector solar, brinda un ambiente saludable y sin emisiones de carbono, siendo nuestro aire menos toxico que contribuya a las enfermedades respiratorias en los seres humanos.

1.6 HIPÓTESIS

No aplicable para la siguiente investigación.

1.7 OBJETIVOS

1.7.1 Objetivo general

Diseñar un colector solar lineal de tipo Fresnel de producción de vapor, para reducir costos de operación en la planta piloto de la USS.

1.7.2 Objetivos específicos

- Identificar la necesidad de vapor en la planta piloto de la USS mediante la aplicación de entrevistas y realizar un cuadro con especificaciones de ingeniería a usar como guía para el diseño del colector solar lineal.
- Generar 04 alternativas de diseño con potencial para solucionar el problema planteado por la planta piloto y obtener el concepto óptimo y la configuración adecuada mediante una matriz de selección por criterios ponderados.
- Dimensionar las partes más importantes del equipo y elaborar los cálculos de las cargas térmicas y mecánicas del equipo, realizando el diseño paramétrico de las partes y/o componentes críticos de la máquina.
- Elaborar los planos de ingeniería para el diseño final del equipo.
- Realizar un análisis económico del proyecto.
- Elaborar un plan de mantenimiento del proyecto.

1.8 ESTADO DEL ARTE

a) Tubo absorbedor

El ISE Fraunhofer Institute en Friburgo, Alemania ha desarrollado en colaboración con la empresa Schott, un tubo con un recubrimiento absorbente que cumpla con altos estándares de resistencia a la temperatura requeridos en el colector. El recubrimiento Cermet es un material compuesto por materiales cerámicos y metálicos. Demostrado ser estable hasta más de 450 ° C, que fue sometido a pruebas desde el 2007 en un tubo absorbedor de 100m de longitud, en el concentrador Fresnel de la Plataforma Solar de Almería. La capa de cermet, adicionando una capa antirreflectante, permite la alta absorción de la radiación solar, mientras que una capa metálica reduce la emisividad. (Fraunhofer-Gesellschaft, s.f.)

Figura 24: Tubos absorbentes desarrollados en Fraunhofer ISE
Fuente: (Fraunhofer-Gesellschaft, s.f.)

b) Concentradores Solares

Para el desarrollo y fabricación de colectores solares térmicos de concentración, es de gran importancia una prueba y evaluación del rendimiento de los colectores. Para garantizar una prueba de rendimiento consistente en el área de colectores de baja temperatura, ya está disponible una norma internacional ampliamente aceptada y utilizada (ISO 806: 2013).

Annie Hofer, investigadora científica del Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, realiza una encuesta centrada en las características de los métodos de evaluación utilizados actualmente para evaluar el rendimiento de los colectores solares. Los participantes están vinculados al grupo de trabajo de Tecnologías de enfoque lineal de STE, del proyecto europeo STAGE-STE.

Añadiendo que los procedimientos de evaluación centrados en mediciones in situ en campos solares o colectores son escasos y complejos, así como una evaluación de colectores lineales de Fresnel u otros sistemas que funcionan con medios de transferencia de calor no comunes como sal fundida y vapor directo. (Hofer, 2016)

CAPITULO II

MATERIAL Y METODOS

II. MATERIAL Y METODOS

En este capítulo se describe las fases del proceso de investigación, tipo y diseño de investigación, precisando las variables de operacionalización. También se explicará las técnicas, instrumentos y procedimiento para la recolección de datos, las cuales tendrán criterios para garantizar la calidad y ética de la investigación.

2.1 Tipo y Diseño de Investigación

Aplicada - Cuantitativa

2.2 Variables

El siguiente proyecto de investigación, asocia su diseño a una determinada metodología, basado en el esquema de variables formuladas por Rudolf Eggert (Eggert, 2010), y George Dieter (Dieter, 2013) donde se plantean: Variables de Solución, variables de Diseño, Parámetros de Definición de problema y Variables Intervinientes.

2.2.1 Caja negra para variables

Para la elaboración de conceptos de solución se ha implementado un diagrama de flujo de datos denominado Caja Negra o Black Box en inglés, método que dispone de variables para el diseño que infieren en variables de solución.

A continuación, se presentará el diagrama de Caja Negra (Figura 25) que se aplicará en este proyecto de investigación.

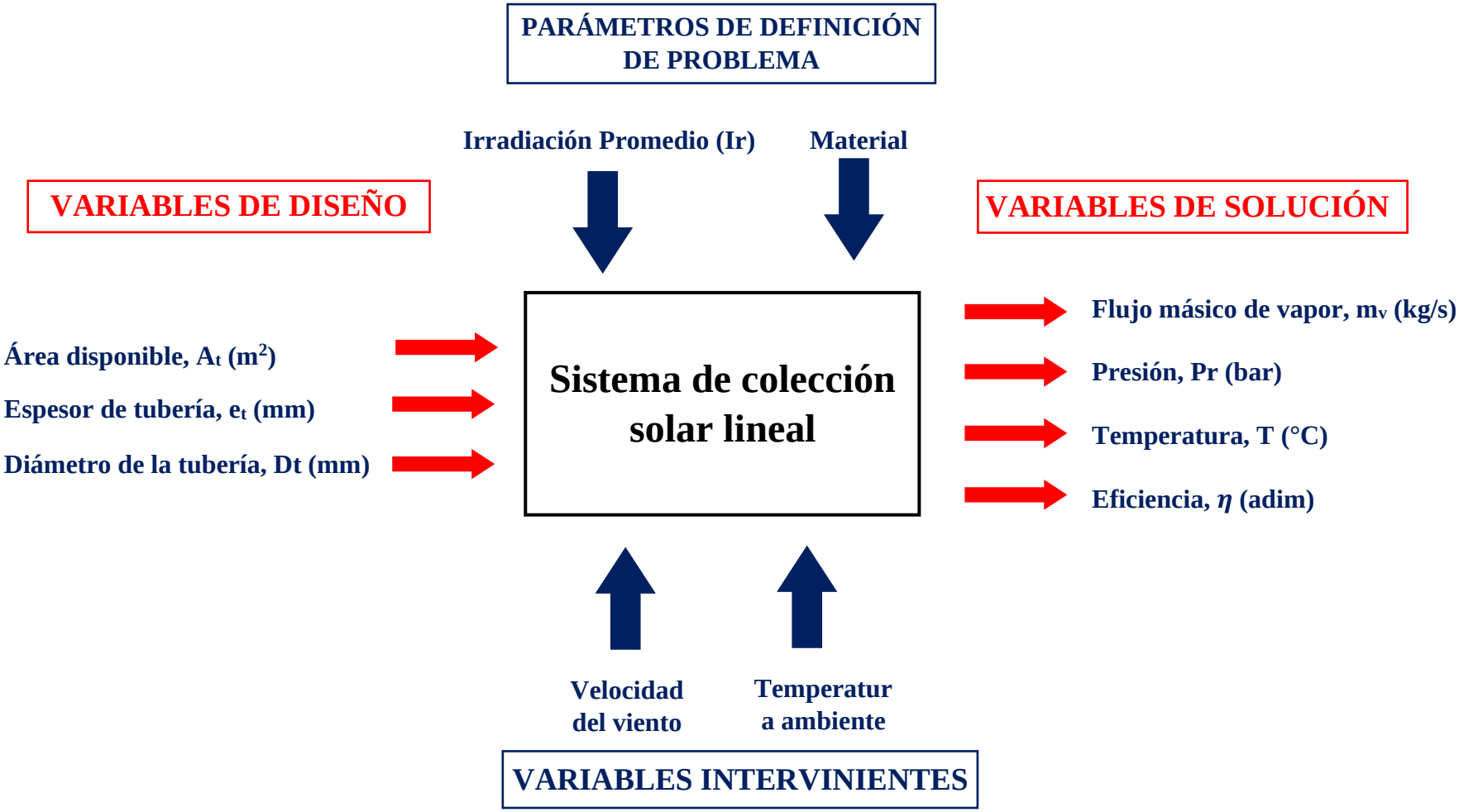


Figura 25: Diagrama de Caja Negra para el sistema LFR
Fuente: Propia

2.2.2 Operacionalización de Variables

En la Tabla 2 se encuentran los detalles de las variables de diseño y se solución para el sistema de colección lineal.

Tabla 2

Operacionalización de variables para el sistema de colección lineal

	VARIABLES	DEFINICION	DIMENSIONES	INDICADOR	ESCALA	INDICE
VARIABLES DE DISEÑO	Diámetro de la tubería	Diagonal que pasa por el centro de la tubería	D=L	Longitud	mm	D
	Flujo másico	Cantidad de vapor requerido por el autoclave	$\dot{m} = \frac{M}{t}$	Masa	Kg	M
				Tiempo	s	t
	Angulo de Inclinación	Angulo entre la superficie de la placa y la superficie de suelo	β	Grados sexagesimales	°	D
VARIABLES DE SOLUCION	Temperatura	Magnitud para medir el calor transferido hacia fluido caloportador	T	Temperatura	°C	T
	Eficiencia	Indicador que evalúa el flujo de vapor generado respecto al teórico	$\eta = \frac{Q_{out}}{Q_{in}}$	Adimensional	-	n

Fuente: Propia

2.3 Población y Muestra

No aplicable para el siguiente proyecto de investigación.

2.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos, variables y confiabilidad

2.4.1 Técnicas de recolección de datos

Para este trabajo de investigación, se utilizaron técnicas de recolección de datos, a fin de recabar la información necesaria para el logro de los objetivos de la investigación

Las técnicas a utilizar son las siguientes:

a) Observación

Técnica que consiste en recolectar datos, visualizando comportamientos o eventos que son evaluados a medida que va ocurriendo, pudiendo señalar características de un entono en particular. Lo cual permite conocer y describir, así como comparar y verificar los datos en la investigación.

La planta piloto ubicada en la Universidad Señor de Sipán, Pimentel, área donde se realizarán concurridas visitas, con la finalidad de adquirir y procesar datos, determinando la problemática que fatiga sus procesos.

b) Entrevistas

Esta técnica permite la elaboración de preguntas reguladas, para obtener la información requerida, a fin de identificar parámetros que permita el diseño del sistema colector.

Esta técnica fue aplicada por el autor, a los ingenieros delegados para el uso de la planta piloto de la USS.

c) Información bibliográfica

Para lograr una óptima información y entendimiento sobre el tema. Las fuentes bibliográficas que se consultarán para la selección de información serán obtenidas de internet, libros, tesis, publicaciones, etc., para el correcto diseño.

d) Análisis de documentos

Para lograr el análisis de documentos (libros, tesis, publicaciones, etc.) se empleará una técnica la cual nos ayudará a seleccionar la información adecuada que nos proporciona las fuentes para el desarrollo de nuestro proyecto.

2.4.2 Instrumentos de recolección de datos

Los instrumentos para una buena recolección de datos serán las siguientes:

- Laptop
- Internet
- Entrevistas

2.4.3 Procedimiento para la recolección de datos

A continuación, se describirá paso a paso el procedimiento de recolección de datos que se empleará en la presente investigación. Mientras que en la Figura 26 se encuentra el diagrama de flujo con cada uno de estos pasos.

Paso 1: Planeamiento de objetivos en la entrevista

Establecer los objetivos de forma clara y precisa para su elaboración, para así obtener datos específicos que necesitamos para el diseño del colector solar lineal.

Paso 2: Determinación programación para entrevistas

Se determinan el lugar y fecha para la realización de las entrevistas, previa coordinación con los ingenieros encargados y alumna.

Paso 3: Ejecución de entrevistas

Se Aplicará la entrevista con los encargados de la planta piloto, pudiendo identificar su acuerdo o no, en acondicionar un sistema de solar para la generación de energía.

Paso 4: Identificar la necesidad de la Planta Piloto

Identificar limitantes y requerimientos, tanto en el proceso de generación de vapor como en su distribución y como un colector solar para la producción de vapor puede mejorar la calidad energética de la planta piloto.

Paso 5: Evaluación de área disponible para el LFR

Se realizará una investigación del posible lugar donde se implementaría el sistema LFR.

Paso 6: Evaluación del dimensionamiento del LFR

Las respuestas de las entrevistas, se van a cuantificar para identificar los parámetros que permitan el diseño de un sistema LFR.

Paso 7: Evaluación de la viabilidad del LFR

De acuerdo al dimensionamiento del LFR se obtendrá una eficiencia, y así también se puede realizar un análisis económico.

Diagrama de flujo del desarrollo de actividades

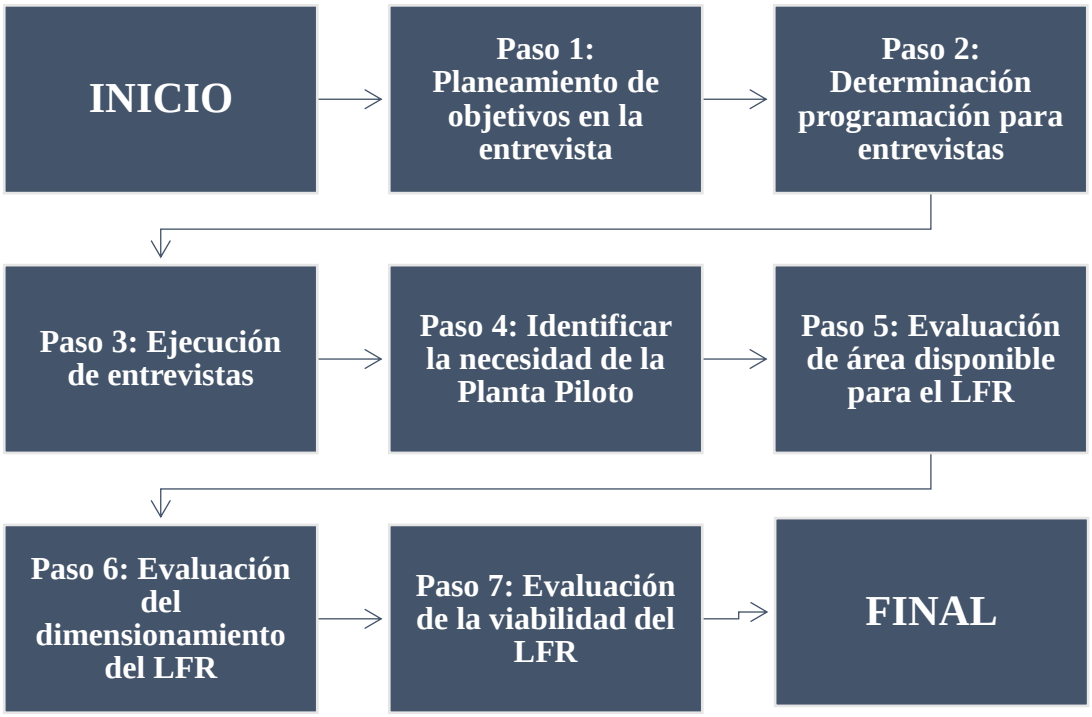


Figura 26: Diagrama de Flujo para el proceso de recolección de datos
Fuente: Propia

2.5 Métodos de análisis de datos

2.6 Aspectos éticos

En el presente proyecto tomará en cuenta criterios basados en la ética profesional del Colegio de Ingenieros del Perú (CIP, 1999) y el Código de Ética de Investigación de la Universidad Señor de Sipán (USS, 2017).

a) Código de ética del Colegio de Ingenieros del Perú (CIP)

El referido documento (ver Anexo 2) señala los valores a seguir por parte del ingeniero en el entorno social, público y laboral durante el ejercicio de su profesión; todo esto para un buen desenvolvimiento y competencia.

b) Código de Ética de Investigación de la USS (USS)

El código estará orientado a delimitar la ética y su aplicación en el trabajo de investigación universitaria (ver Anexo 3). En el contenido se presenta los principios y deberes éticos, consentimiento para emplear datos, políticas anti plagio y procedimiento de sanciones.

CAPITULO III
RESULTADOS

III. RESULTADOS

3.1 Determinación de necesidades de la Planta Piloto

Las necesidades de vapor para las maquias de la planta piloto de la USS se determinaron a través de entrevistas cuyo formato vacio se puede ver en el Anexo 4. Se realizaron en total 4 entrevistas (ver Anexo 5): al director de la planta, al jefe de laboratorio, a un docente técnico y a un estudiante. Estos son los encargados del funcionamiento de la planta piloto. Los resultados de las entrevistas se detallan en la Tabla 3. Las conclusiones de las respuestas obtenidas en las entrevistas se muestran en detalle a continuación.

Pregunta N° 1: ¿Cuál es la función de la planta piloto de la USS?

La planta piloto sirve para el desarrollo de prácticas académicas complementarias a la formación universitaria en las carreras asociadas a industrias alimentarias.

Pregunta N° 2: ¿Qué equipos necesitan de vapor para los procesos de la planta piloto?

a. Marmita
b. Autoclave
c. Exhauster

Pregunta N° 3: ¿Cuáles son las características técnicas de los equipos antes mencionados?

a. La marmita tiene una capacidad 190L, Pmax de 5 Psi, Acero 304
b. La autoclave tiene una capacidad 100L, Pmax de 10 Psi, Acero 304
c. El exhauster trabaja a una Temperatura de 98°C, Acero 304

Pregunta N° 4: ¿Qué tipo de procesos se aplican en la planta y cuanto es el tiempo aproximado que requieren de vapor?

Todos concuerdan en que se requiere vapor por 1h y 30 min aproximadamente.

Pregunta N° 5: ¿Cuáles son las características técnicas del caldero, que abastece de vapor a la planta piloto?

Caldero pirotubular de 8BHP, con una presión de 40 Psi y con un flujo másico de 10kg/min.

Pregunta N° 6: ¿Cuál es volumen de combustible Diésel requerido, para que opere el quemador del caldero durante el tiempo que duren el o los procesos?

Se necesita en promedio aproximadamente 11 L de Diésel.

Pregunta N° 7: ¿Cuál es el tiempo aproximado de precalentamiento del caldero, para alcanzar la temperatura y presión necesaria requerido por los equipos?

El caldero necesita un precalentamiento de 30 min aproximadamente.

Pregunta N° 8: ¿Cuáles son las limitaciones durante el proceso de generación de vapor?

Al operar los tres equipos en simultáneo la presión disminuye un 60 %. La calidad del aire se ve perjudicada por tuberías en mal estado. Desabastecimiento de combustible.

Pregunta N° 9: Luego de tener en cuenta todas las limitaciones en el proceso de generación de vapor por el Caldero. ¿Creé usted importante aplicar un sistema de generación con energía renovable, como la solar? y ¿por qué?

Sí, debido a la importancia de aprovechar una energía limpia y reducir el impacto ambiental.

Pregunta N° 10: ¿Cuánto estaría dispuesto a pagar por un generador de vapor, basado en tecnología solar?

Se podría contar con la suma en promedio aproximada de S/.6 250 soles.

Pregunta N° 11: ¿Qué porcentaje aproximado del consumo piensa usted podría ser reemplazado por un colector solar?

Podría reemplazar en promedio un 30% del flujo de vapor suministrado por la caldera.

Pregunta N° 12: ¿De qué área dispondría para instalar un equipo de captación solar para generación de vapor?

Podrían acondicionar un área máxima de 30 m^2.

Pregunta N° 13: ¿Qué dimensiones piensa usted serían las más adecuadas para un colector solar?

La dimensión seria en promedio un área de 23.75m^2, que se tendrían a disposición.

Tabla 3

Requerimientos de la Planta Piloto para el diseño del LFR

ASPECTOS	Entrevistados / Preguntas	Ing. Walter Símpalo López	Ing. Cristhian Sarango Córdova	Ing. Aurora Vigo Edward	Glemmda Castro Enríquez
Académico	Función de la Planta Piloto	Practicas académicas	Practicas académicas con fines metodológicos	Afianzar conocimientos teóricos con parte experimental	Complemento en los procesos didácticos
	Implementar un sistema de generación con energía solar	Importancia energética	Reduce el impacto ambiental	Fomentar una cultura sostenible	Aprovechar una energía limpia
Diseño	Requerimientos de equipos a vapor	Presión entre 5 a 10Psi	5 – 10 Psi	5 – 10 Psi	5 – 10 Psi
	Parámetros en caldero pirotubular	Pmax de 40 Psi, Flujo másico de 10 kg/min.	Presión entre 32 – 40 Psi	Pmax de 40 Psi, Flujo másico de 10 kg/min.	Presión entre 32 – 40 Psi
	Área disponible	Otorgaría un área de $30m^2$	Otorgaría un área de $15m^2$	Otorgaría un área de $30m^2$	Otorgaría un área de $20m^2$
	Tiempo	Requiere de un flujo de vapor, por 1h y 30 min	Requiere de un flujo de vapor, por 1h y 30 min	Requiere de un flujo de vapor, por 1h y 30 min	Requiere de un flujo de vapor, por 1h y 30 min
	Limitaciones	Disminución en 60% de la presión al operar los tres equipos en simultaneo	Ductos deteriorados, lo cual implica partículas de óxido en el vapor	Desabastecimiento de combustible. Falta de mantenimiento.	Desabastecimiento de combustible
Económico	Rango en Presupuesto	Menor o igual a 15 000 soles	Menor o igual a 5 000 soles	Menor o igual a 10 000 soles	Menor o igual a 5 000 soles
	Abastecimiento de Diésel	Requiere de 12 L en combustible	Requiere de 08 L en combustible	Requiere de 3 galones en combustible	Requiere de 12 L en combustible

Nota: Fuente: Elaboración Propia

3.2 Recomendaciones para diseñar un Sistema LFR

Finalizada la búsqueda de estándares o códigos aplicados al diseño de un Sistema LFR (Lineal Fresnel Reflector), no se encontró la información requerida muy posiblemente debido a que esta es una tecnología en desarrollo. Por tanto, se procedió a confeccionar un cuadro con recomendaciones de diseño para estos equipos las cuales se extrajeron de artículos de investigación recientes. (Ver Tabla 4 y 5)

Tabla 4

Recomendaciones de Diseño

CARACTERISTICAS	RECOMENDACION	FUENTE
MATERIAL	Aplicaciones de espejos por tener una reflectividad de 0.96 a comparación de las hojas de aluminio con una reflectividad de 0.86	(MURUGAN & VIVEK, 2012)
	Aplicar tubo de cobre para el receptor por su buen coeficiente de transferencia de calor y su baja emisividad	(MURUGAN & VIVEK, 2012)
	Recubrir el tubo absorbedor con pintura negra de alta absorbancia	(MURUGAN & VIVEK, 2012)
	Aplicar material aislante al concentrador secundario.	(Ministry of New and Renewable Energy de India, 2015)
	Estructura de acero galvanizado para minimizar el deterioro por corrosión.	(Ministry of New & Renewable Energy of India, 2014)
GEOMETRIA	Para la configuración del sistema colector es necesario considerar una separación entre espejos de tal forma que cuando estén dirigidos hacia la posición más alejada del mediodía solar, no se generen sombra.	(M. Gea, 2012)
	La altura del tubo absorbedor debe ser relativo al ancho del sistema de concentración	(M. Gea, 2012)
	Los espejos para el sistema de concentración son seleccionados de acuerdo al mercado, basado en sus dimensiones comerciales.	(M. Gea, 2012)

Nota: Fuente: Elaboración Propia

Tabla 5

Recomendaciones de Diseño (Continuación)

	Limpieza de los espejos con agua destilada, una vez cada tres días, o en todo caso se puede aplicar agua a presión.	(Ministry of New & Renewable Energy of India, 2014)
MANTENIMIENTO	Inspeccionar los componentes de acero cada seis meses para detectar daños por corrosión, si hubiese presencia de corrosión debe limpiarse y aplicarse una nueva capa de pintura.	(Ministry of New & Renewable Energy of India, 2014)
	En el caso de un bajo rendimiento del tubo absorbedor de debe limpiar con agua destilada la superficie	(Ministry of New & Renewable Energy of India, 2014)
	Inspección visual de válvulas de alivio de presión, y demás complementos.	(Ministry of New & Renewable Energy of India, 2014)

Nota: Fuente: Elaboración Propia

3.3 Especificaciones ingenieriles

Luego de determinar las necesidades de la Planta Piloto, las respuestas deben ser cuantificadas y expresadas en forma ingenieril, indicando para cada sub-función su característica y unidad de medida. Para lo cual se elaboró un cuadro resumen detallando una relación entre las necesidades de la planta y las características planteadas por el autor.

Tabla 6
Especificaciones Ingenieriles

Sub-Función	Características	Unidades	Limites
Tamaño del concentrador	Superficie	Metros cuadrados	≅ 30
Vapor	Temperatura	Celsius	≥ 100
Horario	Tiempo	horas	08:00 – 16:00 horas
Longitud de Tubo Absorbedor	Longitud	metros	≤ 8
Flujo de Vapor	Masa y Tiempo	Kilogramos por minuto	≤ 10

Nota: Fuente: Elaboración Propia

3.4 Diseño conceptual

Luego de revisada la información, asociada a las diferentes geometrías de diseño respecto a los sistemas de LFR, se conceptualizo 4 diseños. Cada diseño tiene características diferentes basado en sus atributos y limitantes.

Concepto 1: Concentrador Parabólico

Estos colectores consisten en espejos largos en forma de U con un eje lineal y sistema de seguimiento solar. Los espejos reflejan la radiación solar directa a lo largo de su línea focal, donde se encuentra un tubo absorbedor. Para evitar la pérdida de calor respecto al aire ambiente, el tubo absorbente está encerrado por un tubo de vidrio al vacío. Un fluido caloportador fluye a través del tubo absorbiendo la radiación concentrada. Una ventaja es su máxima eficiencia solar de 0.21, sin embargo, requiere de altos estándares de preparación para su implementación y el costo de un campo de colectores puede llegar hasta los 500 euros por metro cuadrado.

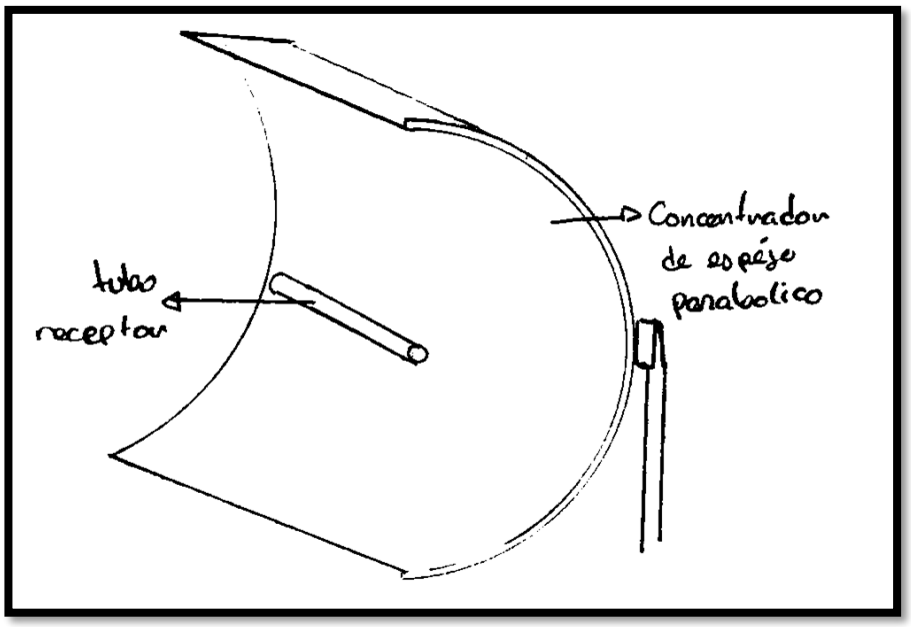


Figura 27: Concentrador Cilindro – Parabólico
Fuente: Elaboración Propia

Concepto 2: Concentrador Lineal Fresnel

El tubo receptor del sistema Fresnel están en una posición fija por encima de los espejos en el centro del campo solar. El sistema puede operar con aceite, agua o sales fundidas. Los diseños actuales usan agua directamente en los tubos receptores en 50 bares de presión y 280 °C.

La ventaja de este sistema de concentración es que tiene un costo menor que los sistemas cilindro-parabólicos, por sus bajos costos de inversión, operación y mantenimiento. Estableciendo un máximo de 250 euros por metro cuadrado. Su desventaja es la simplicidad de su diseño óptico, obteniendo una menos eficiencia solar que llega hasta un 0.15, siendo el más bajo de todos los otros conceptos. Necesitando así aproximadamente un 33% más en área, para la misma producción de energía térmica respecto al colector cilindro-parabólico.

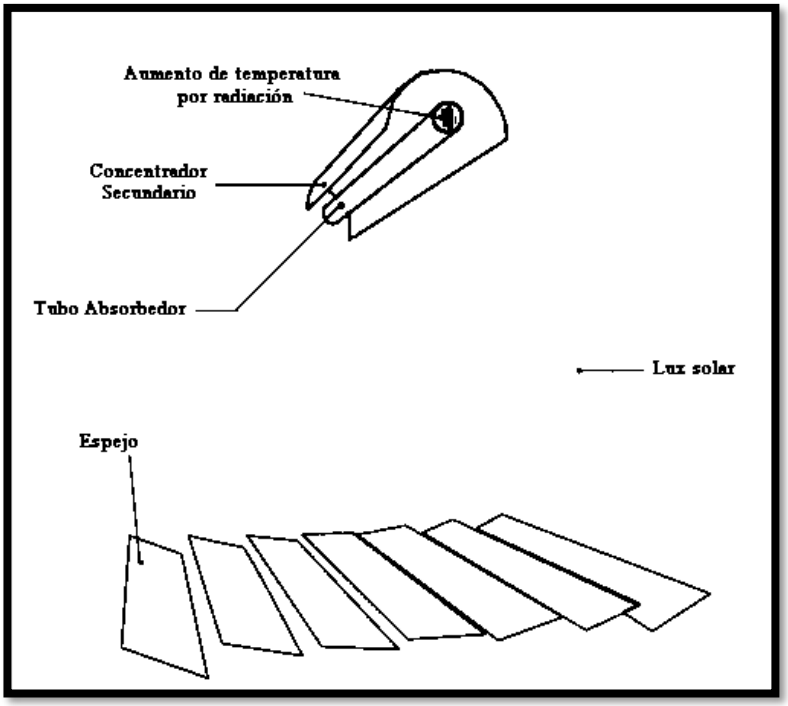


Figura 28: Concentrador lineal Fresnel
Fuente: Elaboración Propia

Concepto 3: Concentrador Solar por Torre

Este sistema usa un gran campo de Heliostatos (espejos), con sistema de rastreo solar en dos ejes, los que reflejan la radiación solar hacia un receptor central ubicado en la parte superior de una torre. Este sistema puede operar con agua, sodio líquido o sales de nitrato fundido, como como fluido caloportador para un receptor tipo tubular, y para el tipo volumétrico, se usa aire para absorber el calor concentrado en el cuerpo metálico o cerámico. Este sistema de concentración puede lograr temperaturas de hasta 1200 °C. Puede llegar a una eficiencia de 0.2, con un costo de hasta 400 euros por metro cuadrado.

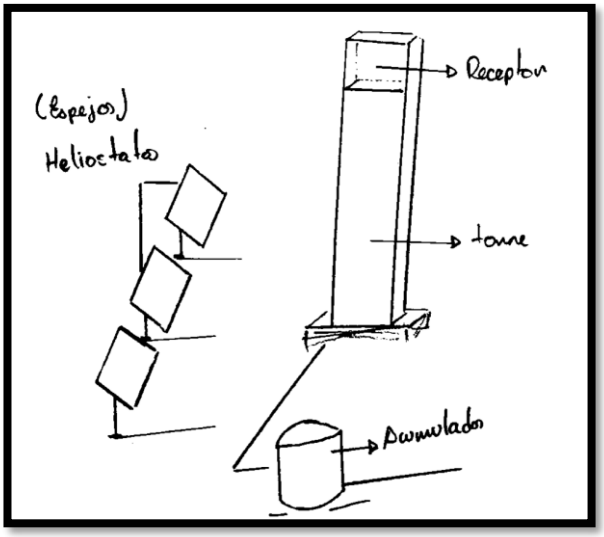


Figura 29: Concentrador Solar Por Torre
Fuente: Propia

Concepto 4: Concentrador de Disco Parabólico

Está formado por una disposición de espejos en una superficie parabólica, con un sistema de seguimiento solar en dos ejes, de esta manera el punto focal siempre se encuentra en el eje óptico de la parábola. Este sistema ha demostrado una eficiencia de 31,25% para la conversión de energía solar, pudiendo costar más de 350 euros por metro cuadrado. Siendo su implementación costosa y con un nivel de preparación para su implementación moderada.

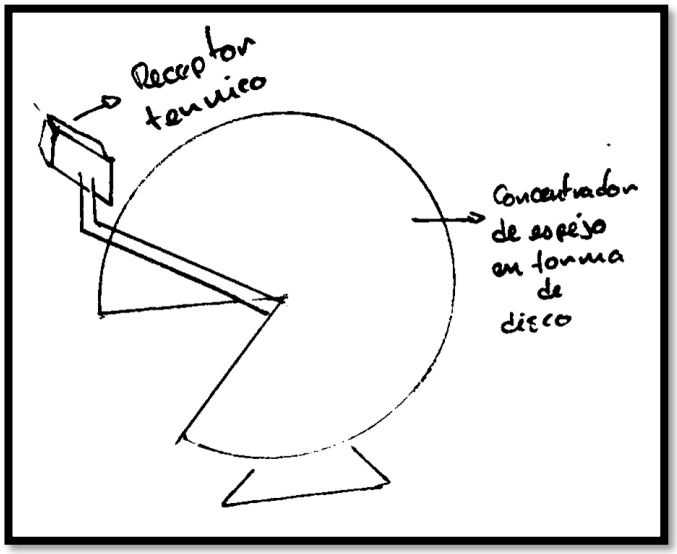


Figura 30: Concentrador de Disco Parabólico
Fuente: Elaboración Propia

3.5 Matriz de Selección

Mediante una matriz de selección se escogió la configuración óptima, bajo los criterios de diseño, evaluación, mantenimiento y costos. La matriz de selección de la Tabla XX, para la puntuación muestra en la primera columna los criterios de evaluación, bajo los cuales se determinará la alternativa de solución ideal. A los criterios se le asigna un valor numérico, según la importancia de cada uno, la puntuación que se asigna a cada alternativa de diseño fue dada de la siguiente manera, Regular (1), Bueno (2), muy Bueno (3). Así mismo se detalla el ponderado asignando un porcentaje para los siguientes criterios (Tabla 7).

Tabla 7

Grado de satisfacción

Puntuación	Grado de Satisfacción
3	Muy Bueno
2	Bueno
1	Regular

Nota: Fuente: Elaboración Propia

Tabla 8

Criterios de Ponderado

INDICADORES	
CRITERIOS	**PONDERADO (%)**
Costo	30
Temperatura Máxima	10
Eficiencia	20
Facilidad de Montaje y Operación	40
TOTAL	**100**

Nota: Fuente: Elaboración Propia

Tabla 9

Selección de concepto optimo mediante matriz de selección

Diseño de un Sistema LFR		**Concentrador Cilindro Parabólico**		**Concentrador Lineal Fresnel**		**Concentrador Solar por Torre**		**Concentrador de Disco Parabólico**	
Criterio	**Ponderado (%)**	**Puntuación**	**Ponderado**	**Puntuación**	**Ponderado**	**Puntuación**	**Ponderado**	**Puntuación**	**Ponderado**
Inversión	30	1	0.8	3	0.5	1	1.5	1	1
Temperatura	10	3	0.3	2	0.2	2	0.4	2	0.3
Eficiencia	20	3	0.5	2	0.3	3	0.4	3	0.6
Facilidad de Montaje y Operación	40	1	1	3	3	1	0.5	1	0.5
TOTAL	**100**	8	2.6	**10**	**4**	7	2.8	7	2.4

Nota: Fuente: Elaboración Propia

3.6 Diseño de Configuración

Se realizó el diseño de configuración para el receptor obteniendo dos configuraciones que se muestran a continuación.

Configuración N° 1:

Presenta un concentrador secundario que permite reflejar la radiación dispersa hacia el tubo absorbedor, cuenta solo con un tubo absorbedor de cobre con una película de pintura que reduce la emisividad, tiene una desventaja en la parte superior por presentar una baja transferencia de calor. El concentrador secundario debe contar con un revestimiento de aislamiento, para reducir las pérdidas hacia el ambiente.

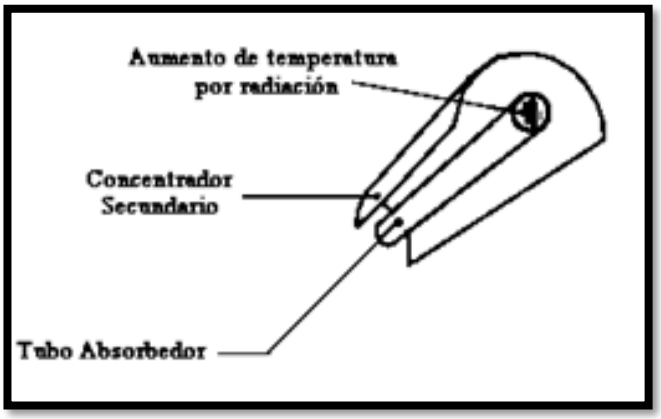


Figura 31: Receptor de un tubo
Fuente: Propia

Configuración N° 2:

Para un receptor con tubos múltiples, de pequeños diámetros dispuestos de forma horizontal, si bien no posee un concentrador secundario, dispone de una cubierta ubicada en la parte superior con una cubierta de aislamiento térmico, que permite las pérdidas de calor por convección hacia el ambiente, tiene una baja eficiencia térmica respecto al receptor de un solo tubo, dado que el calor recibido se encuentra dividido a lo largo de todo el receptor.

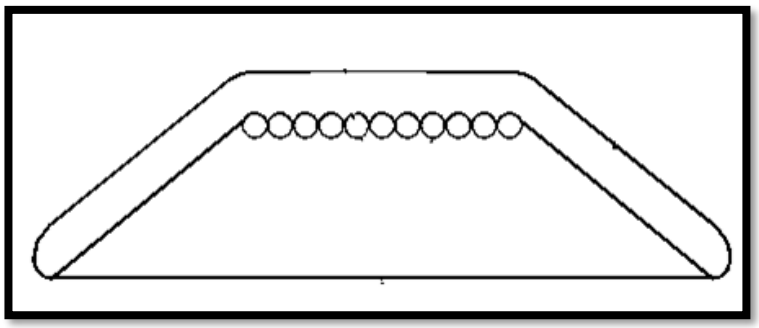


Figura 32: Receptor Multitubo
Fuente: Propia

Tabla 10
Matriz de ponderado para receptor

Receptor del Sistema LFR		**Configuraciones**			
		Configuración N° 1		**Configuración N° 2**	
Criterios	Ponderado (%)	Puntuación	Ponderado	Puntuación	Ponderado
Eficiencia	60	3	2	2	1.5
Mantenimiento	40	2	1.5	2	1.5
Total	100	**5**	**3.5**	4	3

Nota: Fuente: Elaboración Propia

Gracias a la Tabla 10, optando por la configuración N°1 ya que cumple en mayor medida con los criterios (Eficiencia y Mantenimiento) y está acorde a la información revisada de las investigaciones.

3.7 Selección de Material

Se realizó la selección del material para cada parte del sistema LFR, guiándose en las recomendaciones de diseño y de acuerdo a las especificaciones ingenieriles.

3.7.1 Material de Tubo Absorbedor

En la industria por lo general se emplea tuberías de cobre para el suministro de agua y como línea de refrigerantes. El cobre tiene peculiares características, como por ejemplo una alta resistencia al ataque químico y la corrosión, perdida de carga menor en comparación con otras tuberías debido a paredes internas muy lisas, resistente a

altas temperaturas y posee un alto coeficiente de conducción térmica. Estas caracterices las hace ideal para el absorbedor del LFR.

3.7.2 Material de los Espejos

Para reflejar los rayos del sol se empleará una película reflectante de alto brillo con una tasa de reflexión mayor al 90%. Estas películas suelen ser empleadas en la fabricación de concentradores y cocinas solares debido a que pueden ser colocadas sobre superficies curvas.

3.7.3 Material de la Estructura

La estructura de soporte está básicamente construida de tubo cuadrado de 40X40 mm, ensambladas por soldadura de arco eléctrico y diseñada para resistir el peso del tubo absorbedor y las condiciones ambientales de la zona. Para evitar fallas por corrosión se le aplicara una película de pintura epoxica.

3.8 Dimensionamiento del Sistema LFR

El dimensionamiento del sistema LFR, ha sido definido respecto a los 30 m^2 de área disponible, área que fue obtenida de la tabla de especificaciones de ingeniería (Tabla 7). Teniendo delimitada el área para el sistema LFR las dimensiones generales quedaron con una longitud $L = 8\,m$, un ancho $A = 4\,m$ y una altura de $H = 3\,m$. Estas dimensiones son referenciales y se emplearán como base para iniciar el diseño, posteriormente las dimensiones finales se ajustarán de acuerdo a los resultados de los cálculos.

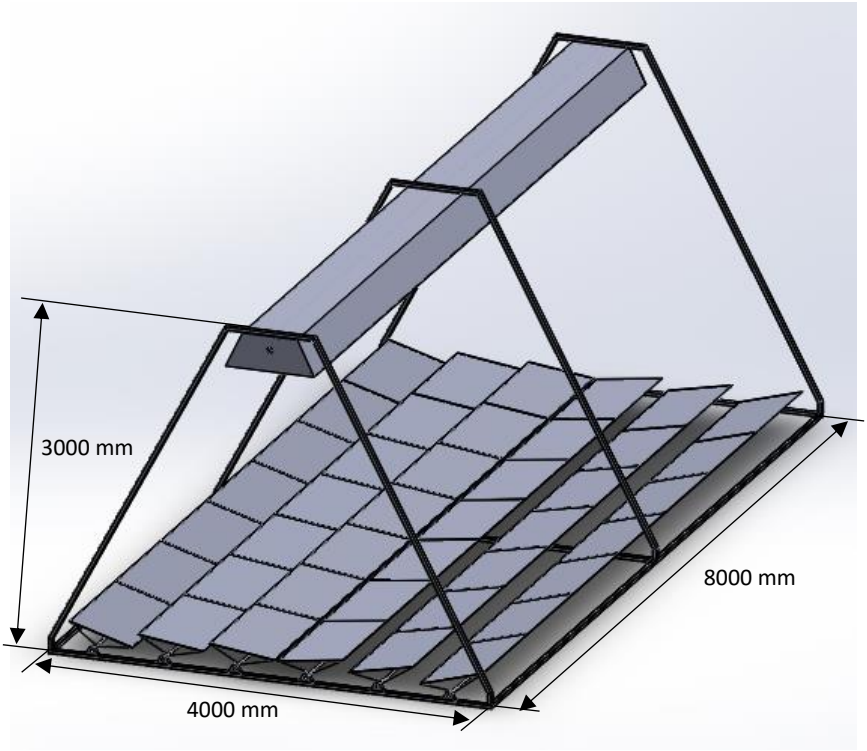


Figura 33: Dimensionamiento del Sistema LFR
Fuente: Propia

La cantidad de espejos dependen del tamaño de los mismos, esto es, el largo y ancho comercial. En el mercado se pueden conseguir espejos de L=1.1m y A=0.6m con las propiedades de la Tabla 12. Por tal razón, el sistema LFR dispondrá de 6 filas con 7 espejos en cada una, haciendo un total de 42 espejos.

La longitud del tubo del colector queda definida por la longitud de LFR (8 m) y el diámetro será determinado mediante un análisis paramétrico de las secciones siguientes.

En el siguiente esquema se detalla los componentes del sistema Colector Lineal Fresnel.

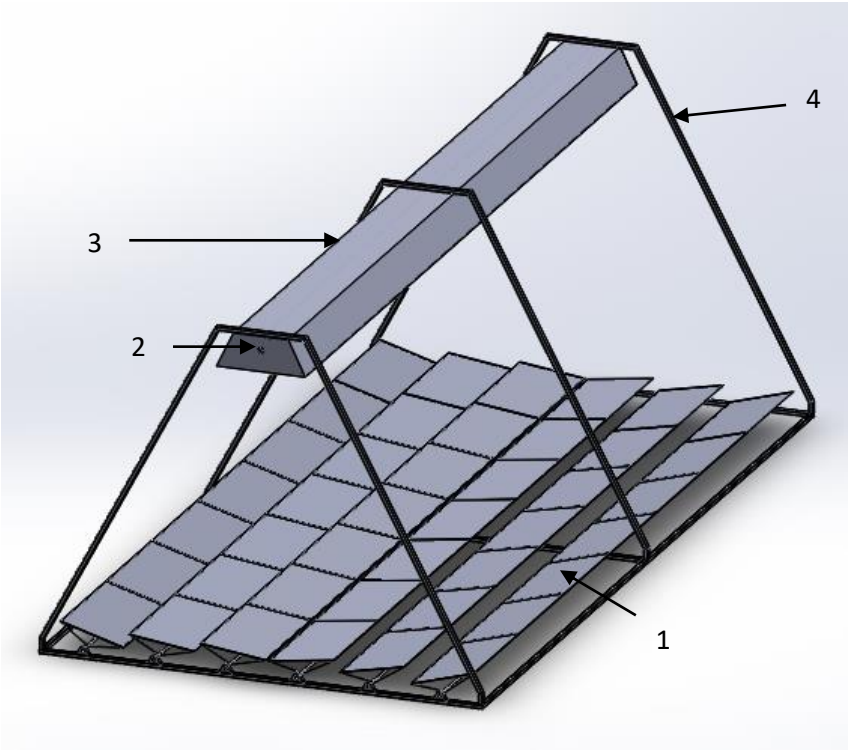


Figura 34: Componentes del Sistema LFR
Fuente: Propia

Donde:

1. Espejos
2. Tubo Absorbedor
3. Concentrador Secundario
4. Estructura de Soporte

3.9 Cálculo de cargas Térmicas

La cantidad de vapor que la caldera es capaz de entregar se pude determinar desde el dato de su capacidad en BHP. Por lo tanto, para la caldera de 8 BHP se tiene:

$$\dot{m}_v = 15.65 \times (8\ BHP) = 125.2\ \frac{kg}{h}$$

Para iniciar con el cálculo del colector se recopilaron todos los parámetros cuyos valores se encentran ya definidos, estos estas relacionados con las dimensiones disponibles del terreno (Tabla 7), las dimensiones de los espejos, y las temperaturas iniciales del agua en el sistema. Con esto parámetros se elaboró la Tabla 11 donde se muestran las dimensiones y temperaturas tomadas inicialmente para el cálculo del panel.

Tabla 11

Parámetros de entrada para el diseño del colector

PARÁMETROS	DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD
$\boldsymbol{L_{ter}}$	Longitud del terreno	8	m
$\boldsymbol{A_{ter}}$	Ancho del terreno	4	m
$\boldsymbol{L_{esp}}$	Longitud del espejo	7.7	m
$\boldsymbol{A_{esp}}$	Ancho del espejo	0.6	m
$\boldsymbol{Refl}$	Reflectividad del espejo	0.96	Adim
$\boldsymbol{H_{abs}}$	Altura del absorbedor	2.8	m
$\boldsymbol{L_{tub}}$	Longitud de la tubería del absorbedor	8	m
$\boldsymbol{W_a}$	Ancho de la apertura	0.6	m
$\boldsymbol{T_r}$	Temperatura del recibidor	120	°C
$\boldsymbol{T_i}$	Temperatura de entrada de fluido	30	°C
$\boldsymbol{T_a}$	Temperatura Ambiente	25	°C

Nota: Fuente: Elaboración Propia

Ubicación geográfica del colector

Para determinar la ubicación del sol y los ángulos que se forman con respecto al colector es necesario conocer la posición geográfica del mismo. El colector será montado en las instalaciones de la Universidad Señor de Sipan, cerca de la planta piloto; para esta ubicación las coordenadas son:

$$6°47'45.4"S\ 79°53'04.5"W$$

Transformando las coordenadas a su forma decimal se obtienen los parámetros de la Tabla 12 necesarios para determinar los ángulos solares.

Tabla 12
Propiedades del Espejo

PARÁMETRO	VARIABLE	VALOR
Longitud estándar	*SL*	-75°
Longitud Local	*LL*	-79.884586°
Latitud local	*L*	-6.795953°
Horario de verano	*DS*	0
Tiempo estándar local	*LST*	12 hr

Nota: Fuente: Elaboración Propia

Duración del día

Por la declinación del sol existen momentos en que los rayos del sol se proyectan de manera perpendicular sobre el eje de la tierra, esto es conocido como Equinoccio. Por otra parte, cuando el sol está a ±23.45° de declinación se llama Solsticio. Para el solsticio de invierno del hemisferio sur el sol se encuentra en su mayor declinación, en la Figura 35 se aprecia que el punto más alto de la curva se encuentra en el día 172 que corresponde al 21 junio.

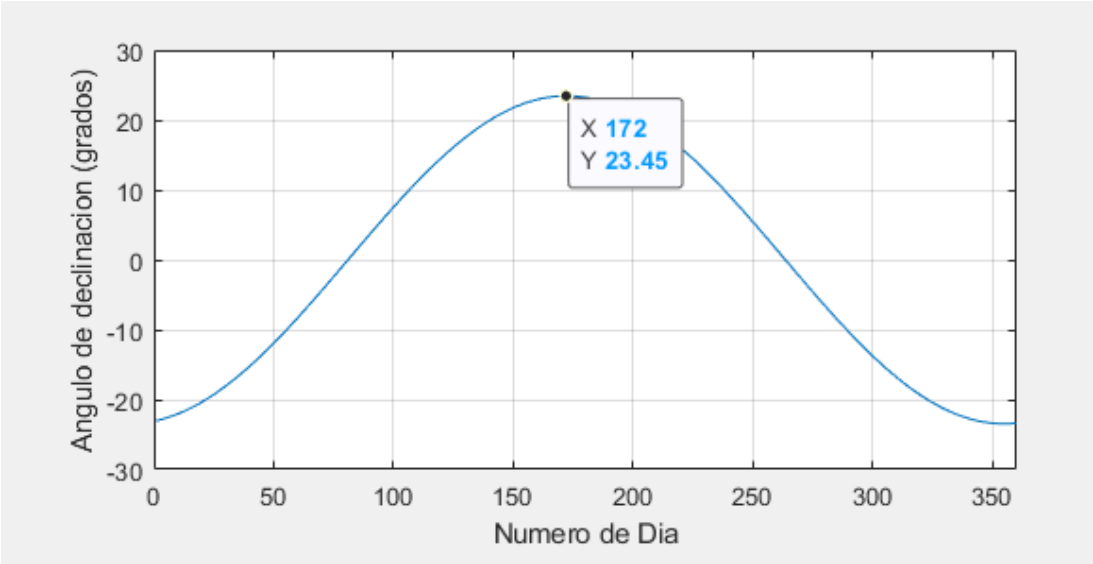


Figura 35: Ecuación de tiempo a lo largo del año.
Fuente: Propia

Para el 21 Junio la duración del día es menor para el hemisferio sur que para el hemisferio norte. Tomando esta fecha y la ubicación geográfica para los cálculos se tiene que la duración del día calculada con la ecuación 15 es:

$$L_{dia} = 11.6049\ h$$

Análisis geométrico del sistema LFR

En el sistema LFR los espejos serán orientados de Sur a Norte (S-N) por la ubicación designada por las coordenadas geográficas y rotarán lateralmente desde el este hacia el oeste (E-W) siguiendo la trayectoria del sol durante el día. El sistema cuenta con 6 filas de espejos y cada fila tendrá su propia inclinación para una hora determinada del día, para asegurar que el sistema de seguimiento oriente adecuadamente la normal de cada fila de espejos, se calcula el ángulo de inclinación para cada uno de ellos. En la Figura 36 se muestra la disposición de los espejos de ambos lados del LFR, cada ángulo esta denominado como θ_{w1}, θ_{w2}, θ_{w3}, para los ubicados a la izquierda del receptor y θ_{e1}, θ_{e2}, θ_{e3}, para los ubicados a la derecha del mismo.

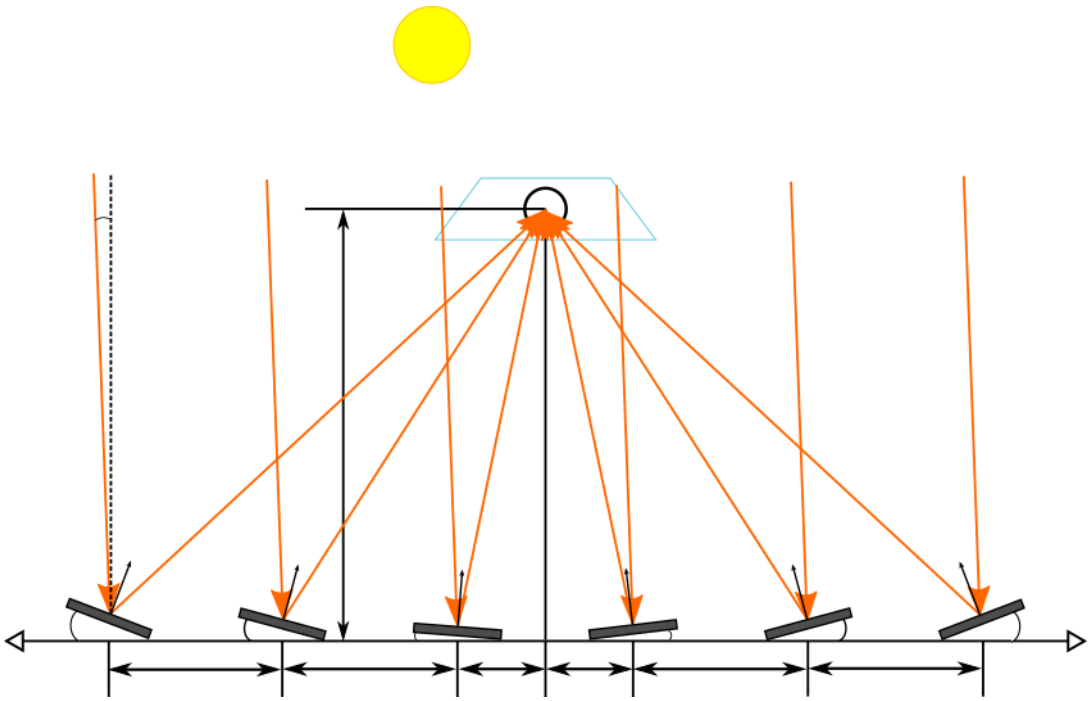


Figura 36: Esquema de un concentrador lineal tipo Fresnel.
Fuente: Propia

Los ángulos de inclinación para cada fila de espejos obtenidos desde la secuencia de cálculo del Anexo 8, se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13
Angulo de inclinación de cada fila de espejo al medio día

DESCRIPCIÓN	VARIABLE	VALOR
Espejo N.º 1 a la izquierda	θ_{w1}	4.1404 °
Espejo N.º 1 a la izquierda	θ_{w2}	10.0581°
Espejo N.º 1 a la izquierda	θ_{w3}	15.0329°
Espejo N.º 1 a la izquierda	θ_{e1}	-8.929°
Espejo N.º 1 a la izquierda	θ_{e2}	-14.8467°
Espejo N.º 1 a la izquierda	θ_{e3}	-19.8215°

Nota: Fuente: Elaboración Propia

Radiación solar absorbida

El mapa de irradiación solar anual de la Anexo 1 muestra la energía solar incidente promedio anual para el Perú. En Chiclayo este valor se encuentra entre los 6 a 7 KW-h/m^2. Como la irradiación se encuentra en unidades de energía (KW-hr) se transforma a unidades de potencia (W), tomado el valor promedio de 6.5 KW-hr/m^2 y calculando la radiación promedio para 12 hr de iluminación solar, con lo cual se obtiene (G_t) .

$$G_t = \frac{\left(6.5\ \frac{KW-hr}{m^2}\right)\left(\frac{3.6\times 10^6\ J}{1\ KW-hr}\right)}{(12\ hr)\left(\frac{3600\ s}{1\ hr}\right)} = 541.66\frac{W}{m^2}$$

Además, la cantidad de radiación absorbida por el receptor (tubo colector) depende de la reflectividad de los espejos la cual es 0.96 y de las propiedades de transmitancia y absortancia de la cubierta de vidrio. A razón de que los rayos del sol son proyectados perpendicularmente hacia la superficie del tubo colector el ángulo de reflexión y refracción es cero, quedando el valor de la radiación como.

$$S = 405.3459\left[\frac{W}{m^2}\right]$$

Propiedades termodinámicas

En el cálculo de coeficientes de transferencia de calor, es necesario conocer la temperatura promedio en la cual determinar las propiedades físicas. Para la el proceso de transferencia de calor por convección hacia el aire, se toma como temperatura promedio $T_{p-air} = (T_a + T_c)/2 = 28.3\,°C$ mientras que para la transferencia de calor desde las paredes del tubo absorbedor hacia el fluido se tomó la temperatura promedio $T_{p-agua} = (T_r + 100)/2 = 110\,°C$. Interpolando para estas temperaturas se obtiene la Tabla 14 con las propiedades de aire y la Tabla 15 con las propiedades del agua saturada.

Tabla 14

Propiedades físicas del aire interpoladas para la temperatura promedio T_{p-air}

PROPIEDAD FÍSICA	VARIABLE	VALOR	UNIDADES
Densidad	ρ_{air}	1.1708	kg/m^3
Viscosidad dinámica	μ	1.8642e-05	$kg/m.s$
Conductividad térmica	k_{air}	0.0258	$W/m\,°C$

Nota: Fuente: Elaboración Propia

Tabla 15

Propiedades físicas del agua interpoladas para la temperatura promedio T_{p-agua}

PROPIEDAD FÍSICA	VARIABLE	VALOR	UNIDADES
Densidad	ρ_f	952.94	kg/m^3
Viscosidad cinemática	v_f	2.705e-07	m^2/s
Numero Prandtl	Pr	1.593	$Adim$
Calor especifico	Cp	4233.1	$J/kg\,°C$
Conductividad térmica del fluido	k_f	0.6825	$W/m\,°C$

Nota: Fuente: Elaboración Propia

En el Anexo 8 se encuentra los cálculos a detalle de cómo obtener los coeficientes de transferencia de calor y el coeficiente de transferencia por perdidas de calor U_L.

3.10 Análisis paramétrico

Cálculo del diámetro del tubo receptor

Para el análisis paramétrico se tomó el diagrama de caja negra de la Figura 25, donde se relaciona la temperatura final del fluido (agua) con el flujo másico del agua que recorre la tubería, para tres diámetros de la tubería. En la Figura 37 se encuentra la gráfica paramétrica.

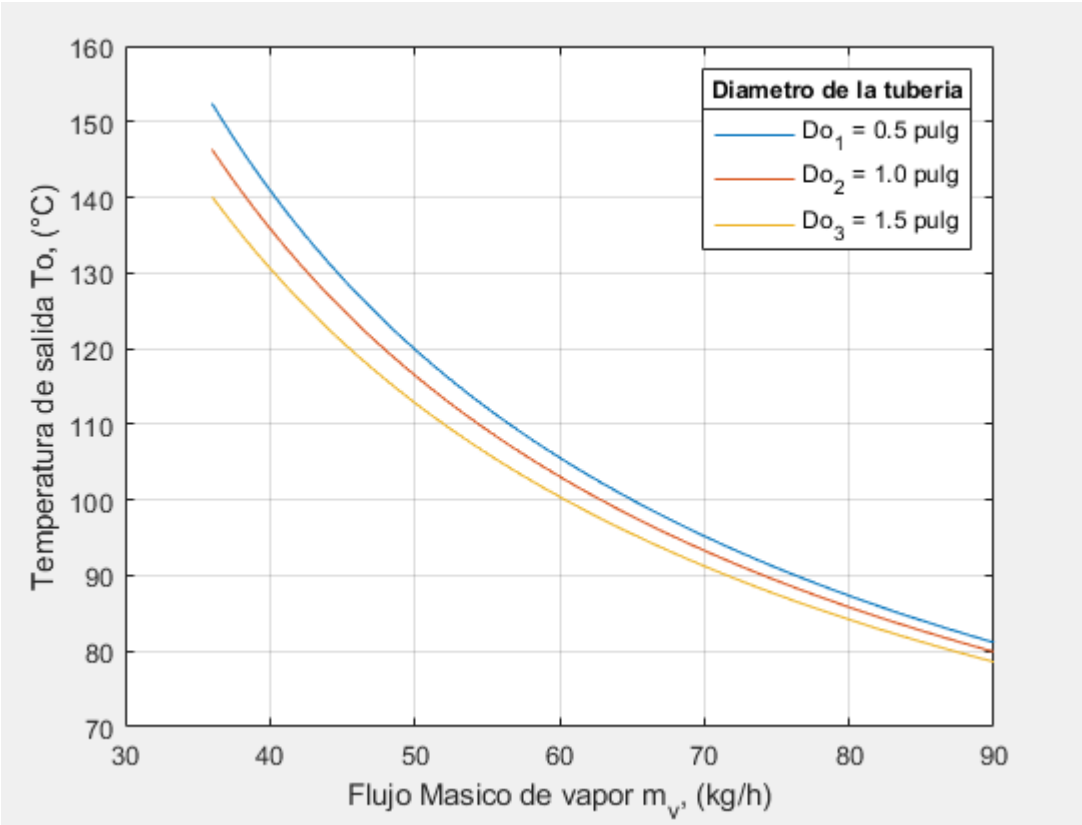


Figura 37: Grafica paramétrica de temperatura final vs el flujo másico del vapor.
Fuente: Propia

Para seleccionar el diámetro adecuado para la tubería del absorbedor se toma como criterio que la temperatura final del vapor debe ser igual o mayor a 100 °C y que se pueda suplir al menos con el 50% de lo que produce la caldera, lo cual equivale a 62.64 kg/h de vapor. En la gráfica de la Figura 38 se muestran tres puntos que cumplen con este criterio, cada punto se encuentra sobre una curva que corresponde a un diámetro de tubería.

En las gráficas se puede observar que a mayor flujo másico de vapor la temperatura disminuye, por otra parte, para diámetros de tubería mayores el flujo másico es menor para una temperatura determinada, esto indica que mientras mayor sea flujo en una tubería de mayor diámetro la temperatura del fluido será menor, por haber mayor cantidad de fluido que deberá ser calentado con la misma cantidad de energía disponible (Qu).

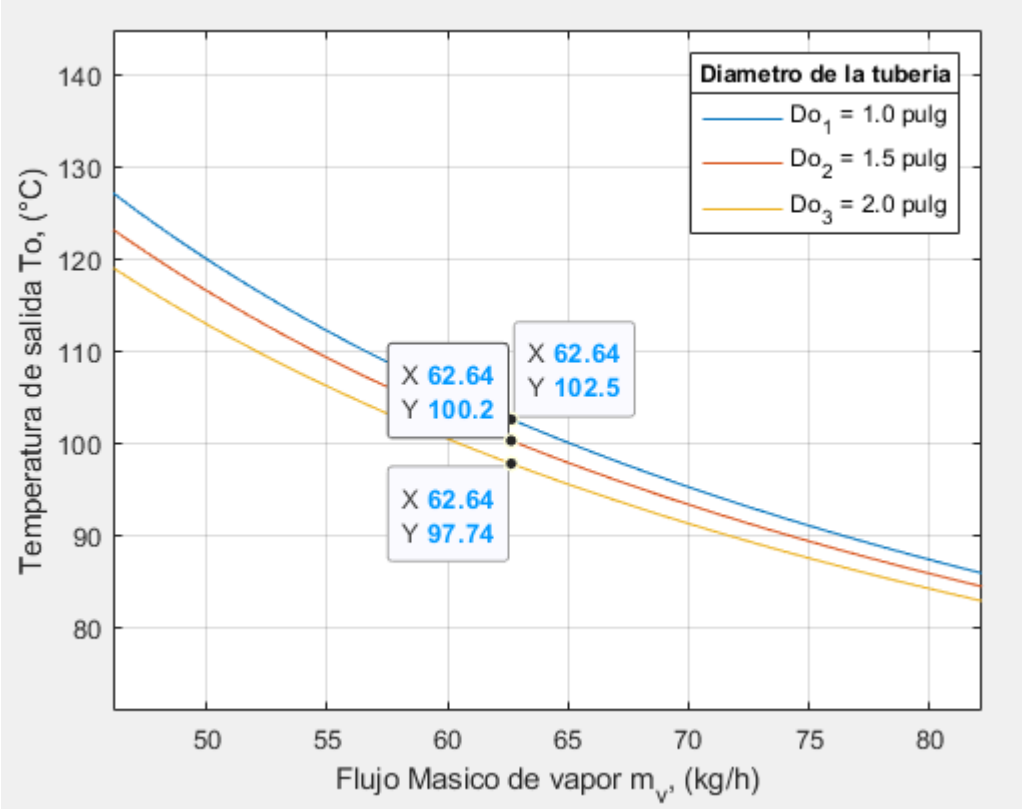


Figura 38: Grafica paramétrica de temperatura final vs el flujo másico del vapor.
Fuente: Propia

De los tres puntos mostrados en la Figura 38, se aprecia que con la tubería de 1” se logra producir 62.64 kg/h vapor con una temperatura de 102.5 °C, con la tubería de 1.5” para el mismo flujo masico la temperatura seria 100.2 °C, mientras que para la tubería de 2” la temperatura que se alcanza es de 97.94 °C. De las tres opciones la tubería de 1” da mejores resultados pues se cumple con el flujo requerido tenido 2.5°C por el arriba de los 100 °C, lo cual es favorable durante el transporte del vapor ya que las perdidas en las tuberías reducen la temperatura final.

3.11 Diseño de selección

Tubería de cobre

El diámetro para el tubo absorbedor se obtuvo del análisis paramétrico de la sección anterior. El tubo absorbedor, deber permitir la óptima transferencia de calor hacia el fluido caloportador (Agua Blanda), generando vapor directamente, sin necesidad de diseñar un intercambiador de calor. Por tanto, basado en las recomendaciones se determinó un tubo de cobre DHP – ASTM B-88 de tipo K, por su alta conductividad térmica.

Tabla 16
Propiedades del Tubo de Cobre

Propiedad	Valor	Unidades
Conductividad Térmica	372.1 – 385.2	W/m*k
Diámetro Máximo	1	Pulgada
Presión Máxima	42.15	Kgf/cm^2

Nota: Fuente: (Raftman, 2018)

Figura 39: Tubería de cobre.
Fuente: Motorex © 2020

Espejos

Los espejos están elaborados por una película reflectante adhesiva la cual permite una perfecta adherencia a superficies planas y curvas. Esta película se consigue por m^2 y tiene una tasa reflectante de 95% - 98.5%, por lo cual es bastante usada en colectores solares. Las características de este material se encuentran en la Tabla XX.

Figura 40: Película adhesiva reflectante.
Fuente: Alibaba.com (2020)

Tabla 17

Propiedades de la lámina reflectante

Propiedad	Valor	Unidades
Material	PET con recubrimiento de aluminio	-
Modelo	RF-015	-
Reflectividad	95 - 98.5	%
Espesor	0.15	mm

Nota: Fuente: Alibaba (2020)

Tubo cuadrado

Para la estructura se empleará tubería cuadrada de 40x40x2 mm con denominación LAC A500, fabricados a partir de planchas laminadas unidas por soldadura por resistencia eléctrica por inducción de alta frecuencia (ERW).

Figura 41: Tubo cuadrado ASTM A500.
Fuente: MIROMINA (2020)

Tubo de vidrio

La cubierta será de un vidrio boro silicato que tiene gran tolerancia a cambios bruscos de temperaturas y con una mínima dilatación térmica. El vidrio borosilicato es muy resistente al agua, a los ácidos, a las soluciones salinas, a las sustancias orgánicas e incluso a los halógenos

Figura 42: Tubo de Vidrio borosilicato.
Fuente: VIDRASA S.A. (2020)

Platina

Hecha de acero A36 laminado en caliente con sección trasversal rectangular con dimensiones 1/8”x1/2”x6m y superficies lisas.

Figura 43: Platina de acero A36.
Fuente: Aceros Arequipa S.A. (2020)

Tubo de acero

El soporte de espejos posee un tubo de acero de 1” que le sirve como eje pivotante para ajustar el ángulo de inclinación de cada grupo de espejos. El material de la tubería es acero ASTM A500 con dimensiones 1” x 1.983mm x 6m.

Figura 44: Tubo de acero ASTM A500.
Fuente: Aceros Arequipa S.A. (2020)

Chumacera

Las chumaceras son empleadas para permitir el giro de los 6 soportes para los espejos, por lo cual en total deberán ser instalados un total 12 chumaceras con rodamientos para eje de 1”.

Figura 45: Chumacera SY 1. TF.
Fuente: Amazon.com (2020)

3.12 Elaboración de Planos del Sistema LFR

Los planos del sistema colector solar lineal tipo Fresnel se muestran en los Anexos 9 al 16, se elaboró 08 planos con las vistas y los detalles geométricos necesarios para la fabricación del sistema colector, el nombre de cada plano se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 18
Planos de Diseño

Código	Plano	Fecha
LFR-01	Vista General	05/02/2020
LFR-02	Vista Estándar	05/02/2020
LFR-03	Colector	05/02/2020
LFR-04	Soporte de espejos	05/02/2020
LFR-05	Concentrador	05/02/2020
LFR-06	Placa parabólica	05/02/2020
LFR-07	Soporte vertical	05/02/2020
LFR-08	Estructura de soporte	05/02/2020

Nota: Fuente: Propia

3.13 Análisis económico

Para ver el beneficio que logra la Universidad Señor de Sipán con el empleo del sistema propuesto en el presente trabajo se realizó un análisis económico donde se considera el gasto mensual de la caldera y el ahorro en combustible gracias al sistema del colector solar lineal tipo Fresnel (LFR).

3.13.1 Presupuesto

El costo de materiales y componentes se muestra en el presupuesto de la Tabla 19. En el cual se detalla las cantidades y el costo de cada componente.

Tabla 19

Presupuesto para el colector tipo Fresnel

MATERIALES	**CANT. (UND)**	**COSTO UNITARIO (S/.)**	**COSTO TOTAL (S/.)**
Tubería de cobre DHP – ASTM B-88 de tipo K – 9 m	1	S/. 870.00	S/. 870.00
Tubo cuadrado 40X40X2 mm - 6 m	9	S/. 51.24	S/. 461.16
Tubería acero negro 1"X1.5mm - 6 m	2	S/. 16.35	S/. 32.70
Pletina 1/8"X1/2" - 6 m	26	S/. 4.67	S/. 121.42
Plancha de acero negro 3X1220x2400 mm	4	S/. 141.70	S/. 566.80
Espejo adhesivo - RF-015 - m2	30	S/. 6.44	S/. 193.20
		TOTAL	**S/. 2,245.28**
ACCESORIOS	**CANT. (UND)**	**COSTO UNITARIO (S/.)**	**COSTO TOTAL (S/.)**
Chumacera SY 1. TF - Dint: 1"	12	S/. 91.47	S/. 1,097.64
		TOTAL	**S/. 1,097.64**
CONSUMIBLES	**CANT. (UND)**	**COSTO UNITARIO (S/.)**	**COSTO TOTAL (S/.)**
Disco de Corte	10	S/. 5.00	S/. 50.00
Electrodo (50 und)	1	S/. 81.27	S/. 81.27
		TOTAL	**S/. 131.27**
MANO DE OBRA	**CANT. (UND)**	**COSTO UNITARIO (S/.)**	**COSTO TOTAL (S/.)**
Operario (día)	5	S/. 60.00	S/. 300.00
Ayudante (día)	5	S/. 50.00	S/. 250.00
		TOTAL	**S/. 550.00**

Tabla 20
Resumen General de costos de fabricación

Resumen	COSTO TOTAL (S/.)
Materiales	S/. 2,245.28
Accesorios	S/. 1,097.64
Consumibles	S/. 131.27
IGV	S/. 625.35
Mano de obra	S/. 550.00
Total	**S/. 4,649.54**

El costo de materiales, accesorios y consumible es de S/. 3,474.19 y el 18% de IGV de esta cantidad es S/. 625.35, por otra parte, el costo de mano de obra para dos trabajadores (Operario y ayudante) durante 5 días de trabajo es de S/. 550. De este modo, la inversión requerida para la fabricación del sistema colector solar lineal es de S/. 4,649.54 como se puede observar en la Tabla 20.

3.13.2 Flujo de caja

De las entrevistas se sabe que la caldera consume 11 Litros de combustible Diésel diario y el costo actual del Diesel es de S/. 3.40 por litro, además considerando que la caldera trabaja durante 1 mes (30 días), el gasto que se genera mensualmente es de S/. 1122.00. Sabiendo que el sistema de colector solar lineal es capaz de cubrir el 50% que produce la caldera se tiene que el beneficio económico mensual es:

$$B = S/.\ 1122.00 * \left(\frac{50}{100}\right) = S/.561.00$$

De esta manera el flujo de caja positivo anual es:

$$CF_j = B * 12 = S/.561.00 * 12 = S/.6732$$

Periodo de Recuperación de inversión (PRI)

El PRI es un indicador del tiempo requerido para recuperar la inversión inicial que este caso es igual al costo total de la máquina. Para calcular el valor monetario (P) a lo largo de un periodo (j) se emplea la ecuación siguiente:

$$P = \sum_{1}^{j} CF_j (1+i)^{-j}$$

Donde:

P: Valor monetario de la inversión inicial (soles)

CF_j: Flujo de caja positivo anual (soles)

i: Tasa de interés anual (adimensional)

j: Periodo de recuperación de la inversión (años)

El flujo de caja de la Figura 46 muestra el tiempo en años y meses en los cuales la inversión inicial es recuperada, y esto se logra a los 9 meses de uso del sistema propuesto. Con esto se observa claramente una ganancia bastante marcada para la universidad en para los próximos años. En las Figuras 47 y 48 se puede ver a detalle la evolución de flujo de caja en un lapso de tiempo de 20 años y el tiempo en el cual se recupera la inversión.

CÁLCULO DE TIEMPO DE RETORNO DE INVERSIÓN DESCONTADO					2%
Year	Cash Flow ($)	CFj ($)	(P/F, 2%, n)	CFj(P/F,18%,n) ($)	Sum ($)
0	-4649.5	-4649.5	1.00000	-4649.5	-4649.5000
1	6732	6732	0.98039	6600	1950.5000
2	6732	6732	0.96117	6470.588235	8421.0882
3	6732	6732	0.94232	6343.713956	14764.8022
4	6732	6732	0.92385	6219.327408	20984.1296
5	6732	6732	0.90573	6097.379812	27081.5094
6	6732	6732	0.88797	5977.823345	33059.3328
7	6732	6732	0.87056	5860.611122	38919.9439
8	6732	6732	0.85349	5745.697179	44665.6411
9	6732	6732	0.83676	5633.03645	50298.6775
10	6732	6732	0.82035	5522.584755	55821.2623
11	6732	6732	0.80426	5414.298779	61235.5610
12	6732	6732	0.78849	5308.136058	66543.6971
13	6732	6732	0.77303	5204.054959	71747.7521
14	6732	6732	0.75788	5102.014666	76849.7667
15	6732	6732	0.74301	5001.975162	81851.7419
16	6732	6732	0.72845	4903.897218	86755.6391
17	6732	6732	0.71416	4807.742371	91563.3815
18	6732	6732	0.70016	4713.472912	96276.8544
19	6732	6732	0.68643	4621.051875	100897.9063
20	6732	6732	0.67297	4530.443014	105428.3493

MOMENTO DE CAMBIO	
0	-4649.50
1	1950.500
Tiempo	0.7045
Año	0
Mes	9

Figura 46: Periodo de retorno de la inversión (PRI).
Fuente: Propia

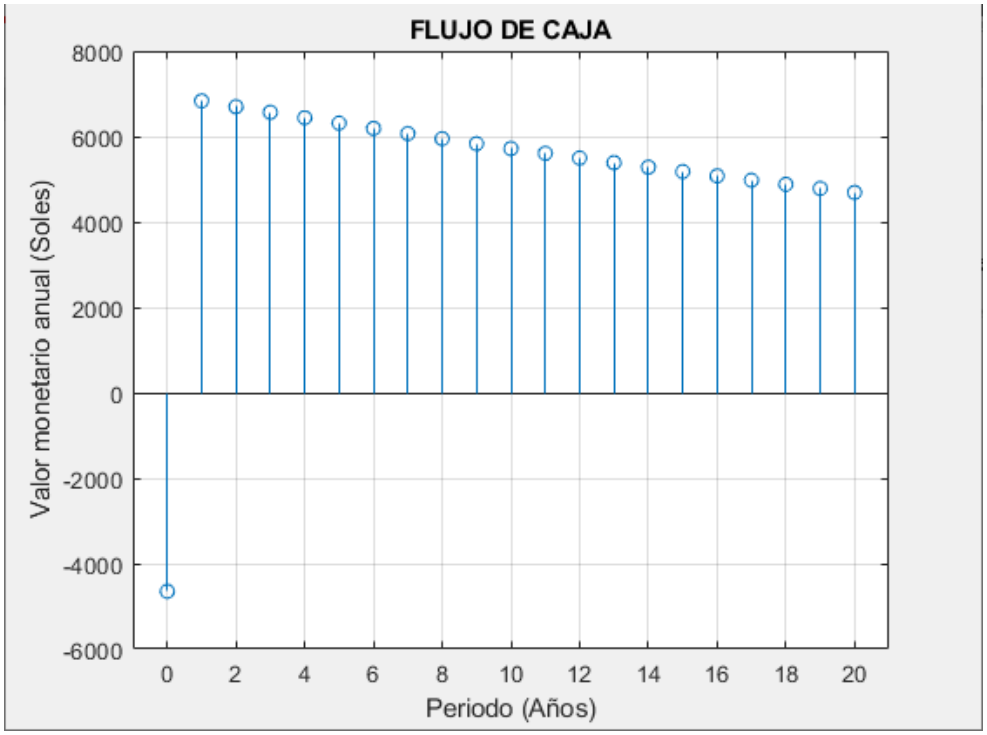


Figura 47: Flujo de caja anual.
Fuente: Propia

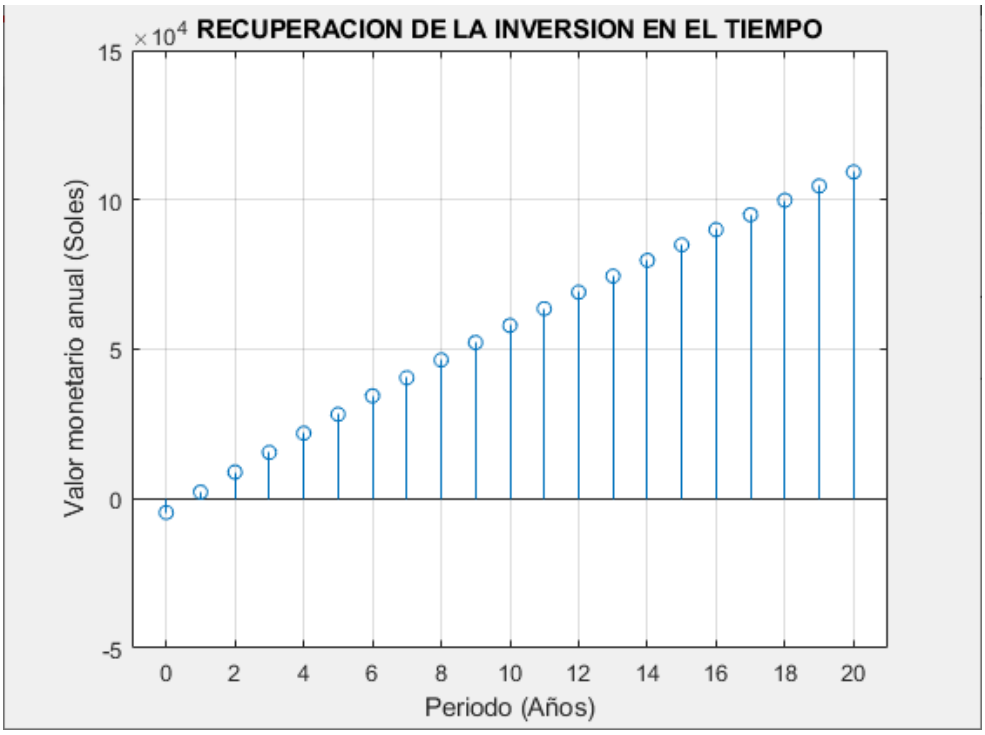


Figura 48: Tiempo de recuperación de la inversión.
Fuente: Propia

3.14 Plan de Mantenimiento

Conservación en temporadas de paro

A menudo las corrosiones más graves ocurren durante las temporadas de paro. Para garantizar una correcta conservación del tubo. La conservación se puede realizar en seco cuando el paro del concentrador es de larga duración, y en húmedo para breves paros o cuando el generador es de reserva y tiene que ponerse en marcha en poco tiempo. En ambos casos hay que realizar operaciones contra posibles corrosiones.

Conservación en seco

Es necesario vaciar y secar el tubo.

Conservación en húmedo

Hay que llenar el tubo del todo, porque la corrosión es un fenómeno producido por la simultánea presencia de agua y oxígeno. Es necesario luego eliminar del agua todo el oxígeno e impedir toda infiltración de aire. Existen substancias que absorben el oxígeno como la hidracina o el sulfito de sodio, pero después de su empleo es necesario controlar la basicidad del agua.

Puesta en Marcha

- Controlar que todas las conexiones estén bien cerradas.
- Controlar que los tubos del agua de alimentación estén limpios
- Cerrar las válvulas de descarga, toma de vapor y descarga indicador de nivel.

Mantenimiento Preventivo Periódico

Periódicamente el encargado cualificado tiene que ir al colector lineal fresnel a verificar el funcionamiento de los accesorios de seguridad.

Limpieza de espejos cada tres días con agua destilada o con agua a presión.

Mantenimiento Preventivo Mensual

Pruebas de funcionamiento del equipo

- Indicadores de presión
- Análisis del flujo másico a su máxima irradiación.
- Comprobar el estado de los espejos

Tomando los puntos anteriores se plantea un mantenimiento mensual, el cual se detalla en la Tabla 21.

Tabla 21

Plan de Mantenimiento para el sistema de colección solar lineal

PLAN DE MANTENIMIENTO MENSUAL
EQUIPO SISTEMA DE COLECCIÓN SOLAR LINEAL
HERRAMIENTAS Termómetro infrarrojo
RIESGOS DE TRABAJO Temperaturas altas en algunas zonas. Precaución para no tocar zonas calientes Excesiva luz solar. Usar lentes de protección negros

PARTE	DESCRIPCION	Ejecutado (SI/NO)	Notas y comentarios
COLECTOR	Limpiar polvo acumulado sobre la cubierta vidrio		
	Revisar existencia de posibles fugas en las uniones		
	Revisar estado de válvulas		
	Verificar la temperatura superficial del colector		
CONCENTRADOR	Limpiar polvo acumulado sobre la superficie reflectante		
	Revisar el nivel de deterioro de la superficie reflectante		
ESPEJOS	Limpiar polvo acumulado sobre la superficie reflectante		
	Revisar el nivel de deterioro de la superficie reflectante		
	Revisar la inclinación de los espejos		
ESTRUCTURA	Comprobar ajuste de tuercas y juntas de soldadura		
	Revisar el nivel de corrosión superficial de la estructura		

3.15 DISCUSION

Se realizaron entrevistas a los colaboradores de la planta piloto de la Universidad Señor de Sipán. Estos resultados nos permitieron iniciar con las especificaciones ingenieriles. Se obtuvo que el área disponible para la captación de energía solar es de 30 m^2 en el techo del edificio de Sistemas con lo cual se tuvo que limitar la longitud de colector a 8 m con un ancho de 4 m, que en total dan 32 m^2 y que se excede por 2 m^2 de lo propuesto por los entrevistados, pero a pesar de ello se decidió tomar tales medidas después de realizarse una visita al lugar y verificar que es viable emplear tales dimensiones.

Debido a la falta de normativa orientada al diseño de sistemas LFR, se vio en la necesidad de extraer recomendaciones de diseño de trabajos académicos similares, en donde se hallan diseñado sistemas LFR, de tales recomendaciones se elaboró las Tablas 4 y 5, obteniéndose información valiosa para aspectos como el material, la geometría y el mantenimiento del sistema LFR. Esta información sumada a las especificaciones de ingeniería de la Tabla 6, permitieron encaminar el diseño del sistema LFR desarrollado en este trabajo.

Para el diseño conceptual se tomaron en cuenta cuatro opciones: Concentrador Cilindro Parabólico, Concentrador Lineal Fresnel, Concentrador por Torre y Concentrador de Disco Parabólico. Luego de realizar una matriz de selección tomando en cuenta los criterios de: costo, temperatura máxima, eficiencia y facilidad de montaje y operación, se determinó que la opción más adecuada es el Concentrador Lineal Fresnel por su bajo costo, accesibilidad y facilidad de montaje y operación. De igual manera para el diseño de configuración las opciones evaluadas con una matriz de selección fueron: Concentrador con tubo lineal recto y Concentrador multitubo (serpentín). De esta matriz se escogió el Concentrador con tubo lineal recto puesto que la eficiencia es mayor ya que aprovecha mayor radiación solar, además de ser de fácil montaje. Tanto para el diseño conceptual como para el diseño de configuración fue de gran ayuda utilizar la matriz de selección como herramienta para la toma de decisiones asegurando de esta manera que el diseño cumpla con los requerimientos esperados.

Para la superficie reflectante inicialmente se consideró usar espejos, pero debido a varios inconvenientes como el peso y la fragilidad de material, se optó por usar una película reflectante con una alta tasa de reflexión y estabilización térmica, además de

ser flexible y barato, se pude usar tanto como espejo para reflejar los rayos, así como también en la placa parabólica para concentrar los rayos en el tubo colector.

Se calculó la carga térmica en función de la capacidad que la caldera, esto es 125.2 kg/h de vapor que es capaz de generar y que abastece a un autoclave, una marmita y un exhauster que se encuentran en la planta piloto. En este trabajo se busca suplir parte del vapor requerido empleando la energía del solar para convertir el agua en vapor, para tal fin fue necesario conocer la Irradiación promedio cuyo valor es $S = 405.3\ W/m^2$ y en su cálculo se considera tanto la ubicación geográfica del colector, la posición solar, el nivel de irradiación promedio anual, y los índices de reflexión y refracción. Para determinar la temperatura a la que sale el vapor, el tubo colector se modelo matemáticamente y se calcularon los coeficientes de transferencia de calor para determinar las pérdidas de calor y el mecanismo de transferencia de calor hacia el fluido. Con estos datos se obtiene una ecuación para el calor útil y la temperatura del vapor a la salida (To).

Con las ecuaciones establecidas se realizó un análisis paramétrico para el tubo colector por ser el elemento crítico en el diseño y para el cual se tomó como variables el diámetro de la tubería, el flujo másico y la temperatura. Los resultados mostraron que el sistema es capaz de proporcionar vapor a una temperatura de 102.5 °C manteniendo un flujo másico de 62.64 kg/h y teniendo un colector de cobre con diámetro de 1 pulgada. La cantidad de vapor obtenido equivale al 50% de lo que es capaz de generar la caldera que está actualmente en uso, esto significa que los gastos en la generación de vapor se pueden reducir alrededor del 50%.

Habiendo definido el diámetro de la tubería se realizó la selección de componentes estándar y la elaboración del presupuesto general de la máquina. Esto permitió realizar el análisis económico donde empleando el PRI se obtuvo que la inversión inicial es recuperada totalmente a los 9 meses y con un beneficio económico anual de S/. 6732.00.

CAPITULO IV
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

IV. CONCLUSIONES

Para determinar las especificaciones ingenieriles, se tuvo que aplicar entrevistas al personal de la planta piloto. Así mismo, la información recopilada se consolido en un cuadro con recomendaciones para limitar y dar inicio el diseño de un sistema LFR.

Por la falta de normativa referente al diseño de sistemas LFR, fue necesario recopilar información de trabajos académicos similares para extraer de ellos recomendaciones útiles para el diseño.

En la toma de decisiones se empleó una matriz de selección tanto para el diseño conceptual como para el diseño de configuración, esto permitió obtener un diseño acorde a las necesidades de la planta piloto. Con esto se concluyó que la opción más adecuada es el Concentrador Lineal Fresnel por su bajo costo, accesibilidad y facilidad de montaje y operación.

Con el fin de determinar la cantidad de energía que se puede aprovechar en forma de calor para producir vapor se modelo la posición del sol a lo largo del año y se calcularon los ángulos de inclinación de cada fila de espejo asegurando así, que los rayos del sol incidan perpendicularmente sobre la superficie del colector. A razón de que la incidencia solar cambia a lo largo del año se tomó el valor promedio de la radiación anual en el Chiclayo para cálculos y se analizó térmicamente el tubo colector para calcular la temperatura final del vapor a la salida.

Con el análisis paramétrico al modelo termodinámico del tubo colector se halló que el diámetro de tubería adecuado es 1” con lo cual se consigue producir el 50% de lo que produce la caldera teniendo a la salida una temperatura de vapor de 102.5 °C.

En la selección de componentes de opto por subseguir el uso de espejos por una película flexible de alta reflectancia lo cual da mejores prestaciones de seguridad e implementación, por otra parte, para la cubierta se seleccionó vidrio borosilicato por su alta tolerancia a los cambios bruscos de temperatura.

Finalmente, con el análisis económico se sustenta la viabilidad del presente diseño el cual al ser implementado dará un beneficio económico de S/. 6732.00 al año.

V. REFERENCIAS

Alcántara , C. (2017). Ránking Universidades Perú. *Economía América*. Obtenido de Economía América: https://rankings.americaeconomia.com/2016/universidades-peru/

Balado Leal, E. (Marzo de 2011). Prototipo de campo de colectores solares cilindro-parabólicos para generación de calor a alta temperatura. Madrid, España: Universidad Carlos III de Madrid.

Bazán Díaz, J. O. (Febrero de 2009). DISEÑO DE SISTEMA CONCENTRADOR SOLAR CILÍNDRICO-PARBÓLICO PARA PROCESO DE DESHIDRATACIÓN DE ALIMENTOS. 169. Piura, Piura, Perú: Universidad de Piura.

CarstenWemhöner, B. H. (s.f.). SIMULATION OF SOLAR THERMAL SYSTEMSWITH CARNOT BLOCKSET IN THE ENVIRONMENT MATLAB SIMULINK. Juelich, Germany,: Solar Institute Juelich.

DASCOMB, J. (Marzo de 2009). LOW-COST CONCENTRATING SOLAR COLLECTOR FOR STEAM. Florida, Estados Unidos.

Dieter, G. (2013). *Engineering design.* New York, The United States: McGraw-Hill.

Eggert, R. (2010). *Engineering design.* Meridian, The United States: High Peak Press.

Energy, A. I. (2010). Existing scenarios and proposals. *Technology Roadmap Concentrating Solar Power*, 49.

Fraunhofer-Gesellschaft. (s.f.). *Fraunhofer ISE*. Recuperado el Noviembre de 2017, de https://goo.gl/r8745k

G. Driggers, R. (2003). Fresnel Lens. En G. D. Ronald, *Encyclopedia of Optical Engineering* (pág. 3104). New York: Dekker.

Gamax Laboratory Solutions Ltd. (2019). *http://gamaxlabsol.com*. Obtenido de http://gamaxlabsol.com/computer-scientist-floating-point-arithmetic/?lang_=EN

Gómez Mercado, A., Aguilar Flores, N., & Rodríguez Castillo, M. (2013). *CONCENTRADOR SOLAR PARA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN EL ITP.* Pachuca de Soto, Mexico: MEMORIAS DEL XIX CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOMIM.

Günther, M. (2010). Linear Fresnel Technology. En I. o. Research, *Advanced CSP Teaching Materials* (pág. 43). Leitung, Alemania.

Hofer, A. (2016). *State of the Art of Performance Evaluation Methods for Concentrating Solar Collectors.* Germany: AIP Publishing.

International Energy Agency. (2010). Concentrating Solar Power. *Technology Roadmap*, 49.

International Energy Agency. (2014). Solar Photovoltaic Energy. *Technology Roadmap*, 60.

International Energy Agency. (2015). Decarbonising the heating and cooling. *Energy Technology Perspectives 2015*, 418.

International Energy Agency. (2017). Catalysing Energy Technology Transformations. *Energy Technology Perspectives 2017*, 443.

International Renewable Energy Agency (IRENA). (2017). Concentrating Solar Power. *Renewable Power Generation Costs in 2017*, 160.

Loayza Ochoa, F. R. (Marzo de 2012). DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SEGUIDOR SOLAR PARA EL CONTROL ELECTRÓNICO DE UN REFLECTOR SCHEFFLER. Lima, Perú.

Lovegrove, K., & Stein, W. (2012). Linear Fresnel refl ector (LFR) technology. En K. Lovegrove, & W. Stein, *Concentrating Solar Power Technology* (pág. 701). UK: Woodhead Publishing.

M. Cosby , R. (1977). *SOLAR CONCENTRATION BY CURVED-BASE FRESNEL LENSES.* Washington D.C.: National Aeronautics and Space Administration.

M. Gea, L. S. (2012). *DISEÑO Y ESTADO DE AVANCE DE LA CONSTRUCCIÓN DE UN CONCENTRADOR FRESNEL LINEAL DE 270 m2.* INENCO. Salta: ASADES.

Ministry of New & Renewable Energy of India. (Noviembre de 2014). Linear Fresnel Reflector "Operations & Maintenance Manual". 30. India: Anthro Power.

Ministry of New and Renewable Energy de India. (Deciembre de 2015). Material and Component Specifications Linear Fresnel Reflector. *UNDP-GEF*. India: Ministry of New and Renewable Energy.

MURUGAN, S., & VIVEK, R. (31 de Noviembre de 2012). DESIGN OF A LINEAR FRESNEL REFLECTOR SYSTEM FOR PRE-HEATING BOILER FEEDWATER. Madurai, India: THIAGARAJAR COLLEGE OF ENGINEERING.

Palenzuela, P., Alarcon Padilla, D. C., & Zaragoza, G. (2015). Combined Fresh Water and Power Production. En *Concentrating Solar Power and Desalination Plants* (pág. 179). Almería, España: Springer International Publishing.

Polo Bravo, C., & Sacari Sacari, E. J. (2009). *EVALUACION EXPERIMENTAL DE UN CONCENTRADOR SOLAR CILÍNDRICO PARABÓLICO (CCP).* Tacna: CERT.

Poullikkas, A. (2013). *A comparative overview of wet and dry cooling systems for Rankine cycle based CSP plants.* Cyprus University of Technology, Electricity Authority of Cyprus. Limasol: Trends in Heat & Mass Transfer.

PVEducation logo. (20 de Junio de 2018). *PVEducation logo*. Obtenido de https://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/calculation-of-solar-insolation

Raftman. (2018). *Raftman.* Obtenido de Raftman: http://www.ememsa.com/default.aspx?id=25

Revelo Benavides, M., & Salazar Muñoz, S. (Mayo de 2015). DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN COLECTOR SOLAR LINEAL DE FRESNEL PARA LA PRODUCCIÓN DE VAPOR EN BASE A LAS CONDICIONES CLIMÁTICAS DE LA CIUDAD DE QUITO. Quito, Ecuador.

Saettone O., E. (2012). *Diseño, construcción y utilización de un Concentrador Solar tipo Fresnel Lineal para Desalinización.* Universidad de Lima, Ingeniería de Sistemas. Lima: XIX- SPES.

Schlaifer, P. (Diciembre de 2012). Performance Calculations and Optimization of a Fresnel Direct Steam Generation CSP Plant with Heat Storage. Suecia.

Senamhi. (s.f.). Energia Solar Incidente Diaria Promedio Anual. Lima, Lima, Peru. Recuperado el Noviembre de 2017, de Deltavolt: http://deltavolt.pe/phocadownload/radiacion_anual.jpg

Stuart Walker, G. (Diciembre de 2013). DEVELOPMENT OF A LOW COST LINEAR FRESNEL SOLAR CONCENTRATOR. 136. Stellenbosch, Provincia Occidental del Cabo, Sudáfrica: Stellenbosch University.

Systemes, D. (s.f.). *SolidWorks Corporation*. (S. Corporation, Editor) Recuperado el Noviembre de 2017, de http://www.solidworks.es

Udawant, R. R., Mohite, K. C., & Takwale, M. G. (2016). Study of Performance of Fresnel Lens Solar. *International Journal of Energy Engineering*, 9.

Wikiwand. (2019). *wikiwand.com*. Obtenido de https://www.wikiwand.com/en/SolidWorks

VI. ANEXOS

ANEXO 1
Mapa de Irradiación Solar Anual

Fuente: (Senamhi)

ANEXO 2
Código de Ética del Colegio de Ingenieros del Perú (CIP)

CÓDIGO DE ETICA DEL CIP

APROBADO EN LA III SESIÓN ORDINARIA DEL CONGRESO NACIONAL DE CONSEJOS DEPARTAMENTALES DEL PERÍODO 1998 - 1999
EN LA CIUDAD DE TACNA 22, 23 Y 24 ABRIL 1999

ANEXO 3
Código de Ética de Investigación de la USS

UNIVERSIDAD SEÑOR DE SIPÁN

www.uss.edu.pe

CÓDIGO DE ÉTICA DE INVESTIGACIÓN DE LA USS

VERSIÓN 03

RATIFICADO POR ACUERDO DE CONSEJO UNIVERSITARIO CON RESOLUCIÓN RECTORAL N° 0851-2017/USS

CHICLAYO - PERÚ

Versión: 03	Código: VRI-CE	F. Implementación:	Página 1 de 29
Elaborado por: Dirección de Investigación	Revisado por: Planificación y Desarrollo Institucional – Asesoría Legal		Ratificado con Resolución Rectoral N° 0851-2017/USS

ANEXO 4

ENTREVISTA DE REQUERIMIENTOS EN LA PLANTA PILOTO DE LA "USS"

Nombres y Apellidos :

Cargo :

INSTRUCCIONES:

- Lea cuidadosamente cada una de las siguientes preguntas, luego responda la interrogante o caso contrario marque en la respectiva hoja su respuesta.

CUESTIONARIO:

1. ¿Cuál es la función de la planta piloto, de la USS?

---

2. ¿Qué equipos necesitan de vapor, para los procesos de la planta piloto?

a.
b.
c.
d.

3. ¿Cuáles son las características técnicas de los equipos antes mencionados?

a.
b.
c.
d.

4. ¿Qué tipo de procesos se aplican en la planta y cuánto es el tiempo aproximado que requieren de vapor?

a.

□ 30 min □ 1 h □ 1h 30 min □ Otro: _____

b.

□ 30 min □ 1 h □ 1h 30 min □ Otro: _____

5. ¿Cuáles son las características técnicas del caldero, que abastece de vapor a la planta piloto?

---

6. ¿Cuál es volumen de Diésel requerido, para que opere el quemador del Caldero durante el tiempo que dure el o los procesos?

a.

□ ½ L □ 1 L □ 1,5 L □ Otro: _____

b.

□ ½ L □ 1 L □ 1,5 L □ Otro: _____

7. ¿Cuál es el tiempo aproximado de precalentamiento del caldero, para alcanzar la temperatura y presión necesaria requerido por los equipos?

□ 15 min □ 30 min □ 45 min □ Otro: _____

8. ¿Cuáles son las limitaciones durante el proceso de generación de vapor?

a.
b.
c.
d.
Otro: _____

9. Luego de tener en cuenta todas las limitaciones en el proceso de generación de vapor por el Caldero. ¿Creé usted importante aplicar un sistema de generación con energía renovable, como la solar? y ¿por qué?

---

10. ¿Cuánto estaría dispuesto a pagar por un generador de vapor, basado en tecnología solar?

□ S/ 5 000 □ S/ 10 000 □ S/ 15 000 □ Otro: _____

11. ¿Qué porcentaje aproximado del consumo piensa usted podría ser reemplazado por un colector solar?

□ 10 % □ 20 % □ 30 % □ Otro: _____

12. ¿De qué área dispondría para instalar un equipo de captación solar para generación de vapor?

---

13. ¿Qué dimensiones piensa usted serían las más adecuadas para un colector solar?

□ 20 m^2 □ 30 m^2 □ 40 m^2 □ Otro: _____

ANEXO 5

ENTREVISTA DE REQUERIMIENTOS EN LA PLANTA PILOTO DE LA "USS"

Nombres y Apellidos : WALTER SIMPALO LÓPEZ

Cargo : DTC

INSTRUCCIONES

- Lea cuidadosamente cada una de las siguientes preguntas, luego responda la interrogante o caso contrario marque en la respectiva hoja su respuesta.

CUESTIONARIO:

1. ¿Cuál es la función de la planta piloto, de la USS?

   La función principal es el desarrollo de prácticas académicas

2. ¿Qué equipos necesitan de vapor, para los procesos de la planta piloto?

   a. Marmita
   b. Autoclave
   c. Extractor
   d.

3. ¿Cuáles son las características técnicas de los equipos antes mencionados?

   a. Marmita : Capacidad 190L, presión 15psi max, Acero 304
   b. Autoclave : Capacidad 100L, presión 10psi max, Acero 304
   c. Extractor : Flujo de 0-5m/min, temperatura 95°C, Acero 304
   d.

4. ¿Qué tipo de procesos se aplican en la planta y cuánto es el tiempo aproximado que requieren de vapor?

   a.
   ☐ 30 min ☐ 1 h ☑ 1h 30 min ☐ Otro: _____

   b.
   ☐ 30 min ☐ 1 h ☐ 1h 30 min ☐ Otro: _____

5. ¿Cuáles son las características técnicas del caldero, que abastece de vapor a la planta piloto?

   Capacidad: 3 BHP, presión 40 psi, pirotubular, Vapor: 10Kg/min.

UNIVERSIDAD SEÑOR DE SIPÁN
PLANTA DE PRODUCTOS AGROINDUSTRIALES
CHICLAYO - PERÚ

6. ¿Cuál es volumen de Diesel requerido, para que opere el quemador del Caldero durante el tiempo que dure el o los procesos?

a.
☐ ½ L ☐ 1 L ☐ 1,5 L ☐ Otro: 12 L

b.
☐ ½ L ☐ 1 L ☐ 1,5 L ☐ Otro: _____

7. ¿Cuál es el tiempo aproximado de precalentamiento del caldero, para alcanzar la temperatura y presión necesaria requerido por los equipos?

☐ 15 min ☑ 30 min ☐ 45 min ☐ Otro: _____

8. ¿Cuáles son las limitaciones durante el proceso de generación de vapor?

a. EN LA GENERACION NO HAY
b.
c.
d.
Otro: CUANDO OPERAN LOS (2) JUNTOS EQUIPOS, LA PRESIÓN CAE UN 60%

9. Luego de tener en cuenta todas las limitaciones en el proceso de generación de vapor por el Caldero. ¿Creé usted importante aplicar un sistema de generación con energia renovable, como la solar? y ¿por qué?

SI, ES IMPORTANTE GENERAR ENERGÍA

10. ¿Cuánto estaria dispuesto a pagar por un generador de vapor, basado en tecnologia solar?

☐ S/ 5 000 ☐ S/ 10 000 ☑ S/ 15 000 ☐ Otro: _____

11. ¿Qué porcentaje aproximado del consumo piensa usted podria ser reemplazado por un colector solar?

☐ 10 % ☐ 20 % ☑ 30 % ☐ Otro: _____

12. ¿De qué área dispondria para instalar un equipo de captación solar para generación de vapor?

AREA DE 30 m^2

13. ¿Qué dimensiones piensa usted serian las más adecuadas para un colector solar?

☐ 20 m^2 ☑ 30 m^2 ☐ 40 m^2 ☐ Otro: _____

ENTREVISTA DE REQUERIMIENTOS EN LA PLANTA PILOTO DE LA "USS"

Nombres y Apellidos : Edward Aurora Vigo

Cargo : DTC – Ingeniería Agroindustrial y CCEE

INSTRUCCIONES:

- Lea cuidadosamente cada una de las siguientes preguntas, luego responda la interrogante o caso contrario marque en la respectiva hoja su respuesta.

CUESTIONARIO:

1. ¿Cuál es la función de la planta piloto, de la USS?

   Servir de prácticas para los estudiantes a fin de reforzar los conocimientos teórico (parte experimental)

2. ¿Qué equipos necesitan de vapor, para los procesos de la planta piloto?

   a. Exhaustor
   b. Marmita
   c. Esterilizador (Autoclave)
   d.

3. ¿Cuáles son las características técnicas de los equipos antes mencionados?

   a. Acero inoxidable / Presión Normal
   b. (P=5si / 140Litros)
   c. Acero inoxidable / P=30psi
   d.

4. ¿Qué tipo de procesos se aplican en la planta y cuánto es el tiempo aproximado que requieren de vapor?

   a.
   ☐ 30 min ☐ 1 h ☒ 1h 30 min ☐ Otro: _____

   b.
   ☐ 30 min ☐ 1 h ☒ 1h 30 min ☐ Otro: _____

5. ¿Cuáles son las características técnicas del caldero, que abastece de vapor a la planta piloto?

   - 8BHP
   - Caldero Pirotubular
   - Presión = 40PSi
   - Capacidad: 30Kg/hora (Vapor)

UNIVERSIDAD SEÑOR DE SIPÁN
PLANTA DE PROCESOS

6. ¿Cuál es volumen de Diésel requerido, para que opere el quemador del Caldero durante el tiempo que dure el o los procesos?

a.

☐ ½ L ☐ 1 L ☐ 1,5 L ☒ Otro: 3galones

b.

☐ ½ L ☐ 1 L ☐ 1,5 L ☐ Otro: _____

7. ¿Cuál es el tiempo aproximado de precalentamiento del caldero, para alcanzar la temperatura y presión necesaria requerido por los equipos?

☐ 15 min ☒ 30 min ☐ 45 min ☐ Otro: _____

8. ¿Cuáles son las limitaciones durante el proceso de generación de vapor?

a. Falta de mantenimiento de equipos de control y en general
b. Falta de Combustible (No se puede medir su consumo)
c.
d.
Otro: _____

9. Luego de tener en cuenta todas las limitaciones en el proceso de generación de vapor por el Caldero. ¿Creé usted importante aplicar un sistema de generación con energía renovable, como la solar? y ¿por qué?

Si, porque es necesario conocer nuevas fuentes de generación y por de crear cultivos sostenible.

10. ¿Cuánto estaría dispuesto a pagar por un generador de vapor, basado en tecnología solar?

☐ S/ 5 000 ☒ S/ 10 000 ☐ S/ 15 000 ☐ Otro: _____

11. ¿Qué porcentaje aproximado del consumo piensa usted podría ser reemplazado por un colector solar?

☐ 10 % ☐ 20 % ☐ 30 % ☒ Otro: 40%

12. ¿De qué área dispondría para instalar un equipo de captación solar para generación de vapor?

Cercanas al Caldero Con 30 m²

13. ¿Qué dimensiones piensa usted serían las más adecuadas para un colector solar?

☐ 20 m² ☒ 30 m² ☐ 40 m² ☐ Otro: _____

ENTREVISTA DE REQUERIMIENTOS EN LA PLANTA PILOTO DE LA "USS"

Nombres y Apellidos : SARANGO CORDOVA CRISTHIAN HENRY.

Cargo : JEFE DE LABORATORIOS - PLANTA PILOTO.

INSTRUCCIONES:

- Lea cuidadosamente cada una de las siguientes preguntas, luego responda la interrogante o caso contrario marque en la respectiva hoja su respuesta.

CUESTIONARIO:

1. ¿Cuál es la función de la planta piloto, de la USS?

   LA FUNCION DE PLANTA PILOTO ES PRINCIPALMENTE EL DESARROLLO DE PRACTICAS ACADEMICAS CON FINES METODOLOGICOS Y EL DESARROLLO DE PRODUCTOS INNOVADORES POR PARTE DE LOS ALUMNOS.

2. ¿Qué equipos necesitan de vapor, para los procesos de la planta piloto?

   a. MARMITA
   b. AUTOCLAVE
   c. EXHAUSTOR
   d.

3. ¿Cuáles son las características técnicas de los equipos antes mencionados?

   a. FABRICADOS EN ACERO INOX C-304.
   b. SENSORES DE TEMPURATURA Y CALOR.
   c. RESISTENTES A LA HUMEDAD.
   d.

4. ¿Qué tipo de procesos se aplican en la planta y cuánto es el tiempo aproximado que requieren de vapor?

   a.
   ☐ 30 min ☐ 1 h ☒ 1h 30 min ☐ Otro: _____

   b.
   ☐ 30 min ☐ 1 h ☐ 1h 30 min ☐ Otro: 06 HORAS.

5. ¿Cuáles son las características técnicas del caldero, que abastece de vapor a la planta piloto?

   TRABAJA A PRESIONES DE 32-40 PSI. ACERO INOX C-304
   FUNCIONA CON COMBUSTIBLE. (PETROLEO).

6. ¿Cuál es volumen de Diésel requerido, para que opere el quemador del Caldero durante el tiempo que dure el o los procesos?

a.
☐ ½ L ☐ 1 L ☒ 1,5 L ☐ Otro: _____

b.
☐ ½ L ☐ 1 L ☐ 1,5 L ☐ Otro: 08 LITROS.

7. ¿Cuál es el tiempo aproximado de precalentamiento del caldero, para alcanzar la temperatura y presión necesaria requerido por los equipos?

☐ 15 min ☒ 30 min ☐ 45 min ☐ Otro: _____

8. ¿Cuáles son las limitaciones durante el proceso de generación de vapor?

a. LOS SENSORES DE T° Y P MAL CALIBRADOS.
b. BAJO CAUDAL DE COMBUSTIBLE.
c. TUBERIAS DE VAPOR EN MALAS CONDICIONES.
d.
Otro: _____

9. Luego de tener en cuenta todas las limitaciones en el proceso de generación de vapor por el Caldero. ¿Creé usted importante aplicar un sistema de generación con energía renovable, como la solar? y ¿por qué?

SI, PORQUE AYUDARIA A LA CONSERVACION DEL MEDIO AMBIENTA Y REDUCIRIA EL IMPACTO AMBIENTAL.

10. ¿Cuánto estaría dispuesto a pagar por un generador de vapor, basado en tecnología solar?

☒ S/ 5 000 ☐ S/ 10 000 ☐ S/ 15 000 ☐ Otro: _____

11. ¿Que porcentaje aproximado del consumo piensa usted podría ser reemplazado por un colector solar?

☐ 10 % ☒ 20 % ☐ 30 % ☐ Otro: _____

12. ¿De qué área dispondría para instalar un equipo de captación solar para generación de vapor?

15 M².

13. ¿Qué dimensiones piensa usted serían las más adecuadas para un colector solar?

☐ 20 m² ☐ 30 m² ☐ 40 m² ☐ Otro: 15 M².

ANEXO 6

Propiedades físicas del aire a presión atmosférica

T (K)	ρ (kg/m^3)	c_p (kJ/kg-°C)	μ (kg/m-s) $\times 10^{-5}$	ν (m^2/s) $\times 10^{-6}$	k (W/m-°C)	α (m^2/s) $\times 10^{-4}$	Pr
100	3.6010	1.0266	0.692	1.923	0.00925	0.0250	0.770
150	2.3675	1.0099	1.028	4.343	0.01374	0.0575	0.753
200	1.7684	1.0061	1.329	7.490	0.01809	0.1017	0.739
250	1.4128	1.0053	1.488	9.490	0.02227	0.1316	0.722
300	1.1774	1.0057	1.983	16.84	0.02624	0.2216	0.708
350	0.9980	1.0090	2.075	20.76	0.03003	0.2983	0.697
400	0.8826	1.0140	2.286	25.90	0.03365	0.3760	0.689
450	0.7833	1.0207	2.484	31.71	0.03707	0.4222	0.683
500	0.7048	1.0295	2.671	37.90	0.04038	0.5564	0.680
550	0.6423	1.0392	2.848	44.34	0.04360	0.6532	0.680
600	0.5879	1.0551	3.018	51.34	0.04659	0.7512	0.680
650	0.5430	1.0635	3.177	58.51	0.04953	0.8578	0.682
700	0.5030	1.0752	3.332	66.25	0.05230	0.9672	0.684
750	0.4709	1.0856	3.481	73.91	0.05509	1.0774	0.686
800	0.4405	1.0978	3.625	82.29	0.05779	1.1951	0.689
850	0.4149	1.1095	3.765	90.75	0.06028	1.3097	0.692
900	0.3925	1.1212	3.899	99.30	0.06279	1.4271	0.696
950	0.3716	1.1321	4.023	108.2	0.06225	1.5510	0.699
1000	0.3524	1.1417	4.152	117.8	0.06752	1.6779	0.702

Notes: T = temperature, ρ = density, c_p = specific heat capacity, μ = viscosity, $\nu = \mu/\rho$ = kinetic viscosity, k = thermal conductivity, $\alpha = c_p\mu/k$ = heat (thermal) diffusivity, Pr = *Prandtl number*

ANEXO 7

Propiedades Fiscas del agua saturada a diferentes temperaturas

Table A5.2 Physical Properties of Saturated Liquid Water

T (°C)	ρ (kg/m³)	c_p (kJ/kg-°C)	ν (m²/s) × 10^{-6}	k (W/m-°C)	α (m²/s) × 10^{-7}	Pr	β (K^{-1}) × 10^{-3}
0	1002.28	4.2178	1.788	0.552	1.308	13.6	
20	1000.52	4.1818	1.006	0.597	1.430	7.02	0.18
40	994.59	4.1784	0.658	0.628	1.512	4.34	
60	985.46	4.1843	0.478	0.651	1.554	3.02	
80	974.08	4.1964	0.364	0.668	1.636	2.22	
100	960.63	4.2161	0.294	0.680	1.680	1.74	
120	945.25	4.250	0.247	0.685	1.708	1.446	
140	928.27	4.283	0.214	0.684	1.724	1.241	
160	909.69	4.342	0.190	0.680	1.729	1.099	
180	889.03	4.417	0.173	0.675	1.724	1.004	
200	866.76	4.505	0.160	0.665	1.706	0.937	
220	842.41	4.610	0.150	0.652	1.680	0.891	
240	815.66	4.756	0.143	0.635	1.639	0.871	
260	785.87	4.949	0.137	0.611	1.577	0.874	
280	752.55	5.208	0.135	0.580	1.481	0.910	
300	714.26	5.728	0.135	0.540	1.324	1.019	

Notes: T = temperature, ρ = density, c_p = specific heat capacity, ν = μ/ρ = kinetic viscosity, k = thermal conductivity, α = c_pρ/k = heat (thermal) diffusivity, Pr = *Prandtl number, β = coefficient of volumetric expansion of fluid*

ANEXO 8

SECUENCIA DE CALCULO

Parámetros de entrada

De las entrevistas realizadas se sabe que la planta piloto cuenta con una caldera pirotubular, la cual presenta las siguientes características:

$BHP = 8\,BHP$: Capacidad de la caldera

$v_c = 12\,L$: Volumen de combustible consumido diariamente

Conociendo la capacidad de la caldera se puede determinar la cantidad de vapor que puede producir trabajando en régimen nominal con la ecuación siguiente:

$$\dot{m}_v = 15.65 \times BHP$$

$$\dot{m}_v = 15.65 \times (8) = 125.2\ \frac{kg}{hr}$$

Radiación Solar

Para efectos de cálculo se tomará el valor estándar para la Irradiación solar

$G = 1360\,\frac{W}{m^2}$: Radiación promedia anual.

Ubicación geográfica del colector

El colector será instalado en la planta piloto de la Universidad Señor de Sipan de Chiclayo – Perú. Por tal razón es necesario conocer las coordenadas geográficas de dicha locación. Las coordenadas de dicho lugar son las siguientes:

$$6°47'45.4"S\ 79°53'04.5"W$$

En formato decimal las coordenadas son:

$$-6.795953, -79.884586$$

Corrección en la Longitud

Para determinar la posición correcta del sol es necesario conocer la hora exacta en la que el sol se encuentra en una posición determinada con respecto a la ubicación del observador. Por tal razón, es necesario hacer una corrección a la longitud geográfica del observador (LL) y con ella conocer el tiempo solar aparente (AST).

Los parámetros que dependen de las coordenadas y la hora y son necesarias para calcular el AST son:

$SL = -75$

$LL = -79.884586$

$L = -6.795953$

$DS = 0$

$LST = 12{:}00{:}00$

Ecuación de tiempo

De la ecuación 7 podemos calcular la variación de tiempo en minutos a lo largo del año. Para el 21 de Junio (día 172) la $ET = -1.5$ como se puede ver en la Figura 40.

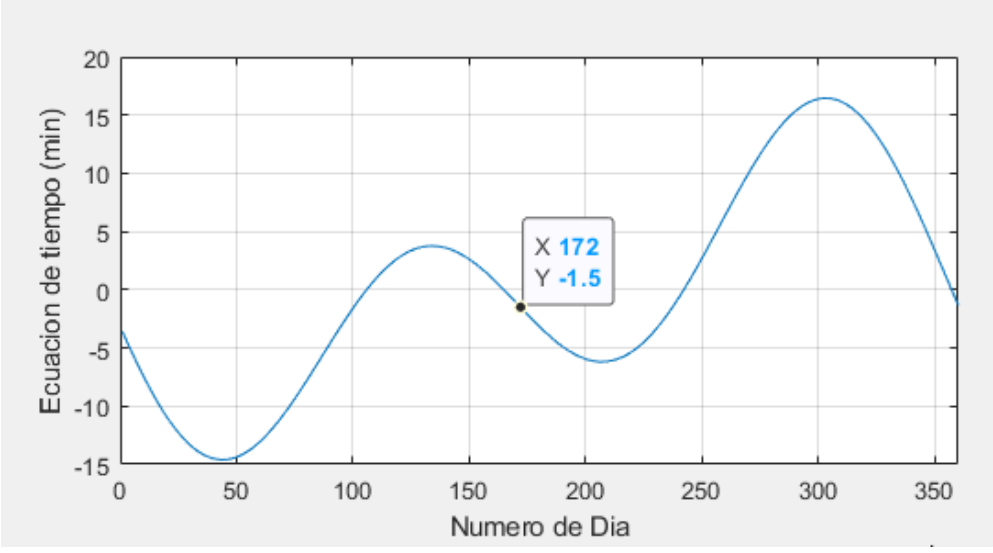


Figura 49: Ecuación de tiempo a lo largo del año.
Fuente: Propia

Tomando la ecuación 9 y el resultado de la ecuación de tiempo para el 21 de Junio, se tiene que el tiempo solar aparente:

$$AST = 12 + \frac{(-1.5) + 4(-75 - -79.884586) - 0}{60} = 12.3006$$

Convirtiendo el AST al formato horario se tiene:

$$AST = 12{:}18{:}02\ AM$$

Angulo horario

Con la corrección del AST se puede calcular la posición del sol a lo largo del plano ecuatorial. Para el cálculo se toma la ecuación XX.

$$h = (12.3006 - 12)15 = 4.509\ °$$

Declinación

En la Figura 37, se puede apreciar la declinación para el 21 de Junio. Empleando la ecuación 10 se obtiene

$$\delta = 23.45 \sin\left(\frac{360}{365}(284 + 172)\right) = -23.45\ °$$

Análisis geométrico del sistema LFR

Angulo de incidencia

El ángulo de incidencia depende de la posición del sol (L, h, δ) y el ángulo de inclinación de la superficie del colector (β, Z_s). Para el sistema de seguimiento con el eje horizontal ubicado de sur a norte y rotación de este a oeste, la ecuación 16 para el ángulo de incidencia se puede reducir a la ecuación 18 y con ella se obtiene su valor para el 21 de Junio a medio día.

Reemplazando los valores anteriormente calculados se obtiene:

$$\theta = cos^{-1}(\cos(30.565)\cos(4.5096) + \cos(23.4498)\sin^2(4.5096))$$

$$\theta = 30.2234°$$

La inclinación para que los espejos dirijan su normal hacia el sol se obtiene con la ecuación 19.

$$\beta = \tan^{-1}(\tan(30.565)\,|\cos(90 - 8.1548)|) = 4.7886°$$

Para determinar el ángulo de inclinación se emplea una relación geométrica entre el ángulo de inclinación para cualquier superficie que proyecta su normal hacia el sol (β) y el ángulo Φ_n, determinado por la altura del colector (H) y la distancia a la que se encuentra el espejo en el horizonte Q_n. En la figura 50 se representan los ángulos que forman los rayos reflejados por un espejo.

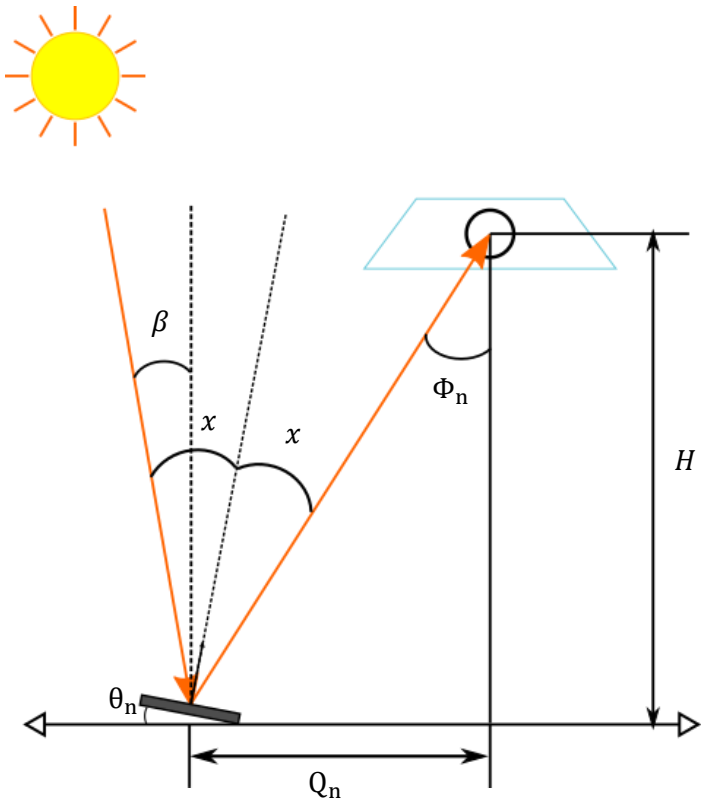


Figura 50: Ángulos representativos para un rayo reflejado hacia el colector.
Fuente: Propia

Como los espejos se encuentran ubicados simétricamente a ambos lados; para los espejos que se encuentran a la izquierda del colector el ángulo de inclinación es:

$$\theta_{wn} = \frac{\beta}{2} + \frac{\Phi_n}{2}$$

Para los espejos que se encuentran a la derecha del colector el ángulo de inclinación es:

$$\theta_{en} = \frac{\beta}{2} - \frac{\Phi_n}{2}$$

Aplicando las ecuaciones para el mismo día y hora se tiene:

Descripción	Variable	Valor
Espejo N.º 1 a la izquierda	θ_{w1}	4.1404 °
Espejo N.º 1 a la izquierda	θ_{w2}	10.0581°
Espejo N.º 1 a la izquierda	θ_{w3}	15.0329°
Espejo N.º 1 a la izquierda	θ_{e1}	-8.929°
Espejo N.º 1 a la izquierda	θ_{e2}	-14.8467°
Espejo N.º 1 a la izquierda	θ_{e3}	-19.8215°

Reflexión y refracción de un haz a través de una cubierta de vidrio

De la ecuación 20 se despeja el ángulo de refracción θ_2, obteniendo:

$$\theta_2 = sin^{-1}\left(\frac{\sin(0)}{1.526}\right) = 0$$

Donde tomando $\theta_1 = 0$ y $n = 1.526$, pues los rayos son proyectados a través de la cubierta de vidrio perpendicularmente sobre la superficie circular de la tubería receptora, por lo tanto, el ángulo de refacción es cero.

Empleando los ángulos de reflexión y refracción se pude determinar la transmitancia de la cubierta de vidrio. Simplificando las ecuaciones 21 y 22 para un ángulo de reflexión y refracción igual a 0º, se tiene:

$$r_{(0)} = r_{\perp} = r_{\parallel} = \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2$$

$$r_{(0)} = \left(\frac{1.526-1}{1.526+1}\right)^2 = 0.0434$$

Con la ecuación 23 se tiene la transmitancia de las perdidas por absorción.

$$\tau_{\alpha} = e^{\left(-\frac{0.037}{\cos(8.5424)}\right)} = 0.9633$$

La transmitancia para la cubierta de vidrio es entonces:

$$\tau = \tau_{\alpha}\left(\frac{1-r_{(0)}}{1+r_{(0)}}\right)\left(\frac{1-r_{(0)}^2}{1-\left(r_{(0)}\tau_{\alpha}\right)^2}\right)$$

$$\tau = 0.9633\left(\frac{1-0.0434}{1+0.0434}\right)\left(\frac{1-0.0434^2}{1-(0.0434*0.9633)^2}\right) = 0.8835$$

Radiación solar absorbida

Para el caso de tener a disposición la radiación solar incidente medida se emplea la ecuación 26:

$$S = \mathrm{R_f}\, G_t (\tau\alpha)_{av}$$

Para obtener $(\tau\alpha)_{av}$ el cual se determina como:

$$\frac{a}{a_n} = 1 + \left(2.0345 \times 10^{-3}(0)\right) - (1.99 \times 10^{-4}(0)^2) + (5.324 \times 10^{-6}(0)^3) - (4.799 \times 10^{-8}(0)^4) = 1.$$

$$(\tau\alpha)_B = 1.01(0.8835)(1)(0.91) = 0.812$$

$$(\tau\alpha)_{av} \cong 0.96(0.812) = 0.7795$$

Incluyendo la reflectividad de los espejos la radiación solar absorbida es:

$$S = (0.96)(1360)(0.7795) = 1017.7\left[\frac{W}{m^2}\right]$$

Análisis termodinámico

Geometría del colector

Las tres áreas principales que se debe calcular son el área del colector (A_r), el área superficial de la cubierta de vidrio (A_c) y el área de apertura del concentrador (A_a). El área de apertura se reduce a lo largo del día debido a la sombra que generan los espejos entre ellos mismos, por tal razón para efectos de cálculo se considerara el 50% del área total, esto quiere decir que el 50% del área de los espejos esta cubierta por la sombra, efecto que se obtiene durante las primeras horas del día y las ultimas horas de la tarde.

$$A_r = \pi D_o L_{tub} = \pi(0.0254\ m)(8\ m) = 0.6384\ m^2$$

$$A_c = \pi D_g L_{tub} = \pi(0.0508\ m)(8\ m) = 1.2767\ m^2$$

$$A_a = (6)W_{esp}L_{esp}(0.2) = (6)(0.6\ m)(7.7\ m)(0.5) = 13.86\ m^2$$

Con las áreas determinadas se calcula la relación de concentración:

$$C = \frac{A_a}{A_r} = \frac{13.86\ m^2}{0.6384\ m^2} = 21.7115$$

Coeficientes de transferencia de calor por perdidas

Para calcular los coeficientes de trasferencia de calor es necesario definir la temperatura de la cubierta de vidrio, esta no se conoce inicialmente por lo cual se asumió un valor de 35 °C, luego por iteración se halló el valor correcto es cual es 31.6 °C. De la ecuación 32 el coeficiente de trasferencia de calor por radiación es:

$$h_{r,r-c} = \frac{(5.67 \times 10^{-8})(393 + 304.6)(393^2 + 304.6^2)}{\left(\frac{1}{0.92}\right) + \left(\frac{0.6384}{1.2767}\right)\left(\frac{1}{0.87} - 1\right)} = 8.418\frac{W}{m^2K}$$

Mientras que el coeficiente de transferencia de calor por radiación del colector hacia el medio ambiente es:

$$h_{r,c-a} = 4(5.67 \times 10^{-8})(0.87)(304.6)^3 = 5.5764\ \frac{W}{m^2K}$$

Debido a que se considera que no hay aire entre el receptor cilíndrico el coeficiente de transferencia de calor por convección se desprecia y solo se calculara el coeficiente entre la superficie del colector y el medio ambiente. En este caso es necesario determinar las propiedades del aire a la temperatura promedio entre la cubierta y el aire.

$$T_{p-air} = \frac{T_a + T_c}{2} = \frac{25\ °C + 35\ °C}{2} = 30\ °C = 303\ K$$

Se emplean las propiedades termo físicas del aire de la Tabla 14 y se obtiene el número de Reynolds como:

$$Re_{air} = \frac{\rho_{air} V D_c}{\mu} = \frac{(1.1708)(5)(0.0508)}{1.8642 \times 10^{-5}} = 15952$$

Para 1000< Re < 50000

$$Nu = 0.3(Re_{air})^{0.6} = 0.3(15952)^{0.6} = 99.7283$$

El coeficiente de transferencia de calor por convección para la cubierta de vidrio es entonces:

$$h_{c,c-a} = h_w = \frac{Nu\ k_{air}}{D_c} = \frac{(99.7283)(0.0258)}{0.0508} = 50.5595 \frac{W}{m^2K}$$

Entonces el coeficiente de transferencia de calor por perdidas es:

$$U_L = \left[\frac{0.6384}{(50.5595 + 5.5764)1.2767} + \frac{1}{8.418}\right]^{-1} = 7.8308\ \frac{W}{m^2K}$$

Coeficiente de transferencia de calor por convección en el interior del tubo

Como en el caso del coeficiente de transferencia de calor por convección entre la cubierta y el aire, el coeficiente de transferencia de calor por convección dentro del tubo puede ser obtenido por medio de numero de Nusselt (Nu) y el número de Reynolds, por lo tanto, es necesario determinar las propiedades del fluido dentro del tubo para una temperatura promedio entre la superficie de la tubería receptora y la temperatura media del fluido.

$$T_{p-agua} = \frac{T_r + T_f}{2} = \frac{120\ °C + 110\ °C}{2} = 110\ °C$$

Empleando los datos de la Tabla 15 se calcula el número de Reynolds. Aquí se hace necesario conocer la velocidad del fluido dentro de la tubería, es así que se calcula la velocidad del flujo de vapor equivalente al 50% de la caldera.

$$V_f = \frac{\dot{m}_v}{\rho_f\left(\frac{\pi D_i^2}{4}\right)} = \frac{0.0174\frac{kg}{s}}{\left(952.94\frac{kg}{m^3}\right)\left(\frac{\pi(0.0186\ m)^2}{4}\right)} = 0.0672\frac{m}{s}$$

$$\mu = \rho_f \nu_f = (952.94)(2.705 \times 10^{-7}) = 2.5777 \times 10^{-4}\frac{kg}{m.s}$$

$$Re_f = \frac{\rho_f V_f D_i}{\mu} = \frac{(952.94)(0.0672)(0.0186)}{2.5777 \times 10^{-4}} = 4617.8$$

Para flujo turbulento Re > 2300

$$Nu = 0.023(4617.8)^{0.8}(1.593)^{0.4} = 23.6681$$

$$h_{fi} = \frac{(23.6681)(0.6825\ \mathrm{W/m\ °C})}{0.0186\ m} = 868.466\frac{W}{m^2K}$$

Energía útil

En el cálculo de la energía útil que es enviado al fluido los parámetros F' y F_R son importantes. Con datos obtenidos en los cálculos siguientes se determina el valor para ambos parámetros.

Factor de eficiencia del colector

$$F' = \frac{\frac{1}{7.8308}}{\frac{1}{7.8308} + \frac{0.0254}{(868.466)(0.0186)} + \left(\frac{0.0254}{2(385)} \ln\left(\frac{0.0254}{0.0186}\right)\right)} = 0.9878$$

Factor de eliminación de calor

$$F_R = \frac{(0.0174)(4.2331)}{(0.6384)(7.8308)}\left[1 - \exp\left(-\frac{(7.8308)(0.9878)(0.6384)}{(0.0174)(4.2331)}\right)\right] = 0.9554$$

Energía útil en función de la temperatura de entrada del agua

$$Q_u = 0.9554[(405.3459\ )(13.86\ ) - (0.6384)(7.8308)(30 - 25)] = 5343.4\ W$$

Eficiencia del colector

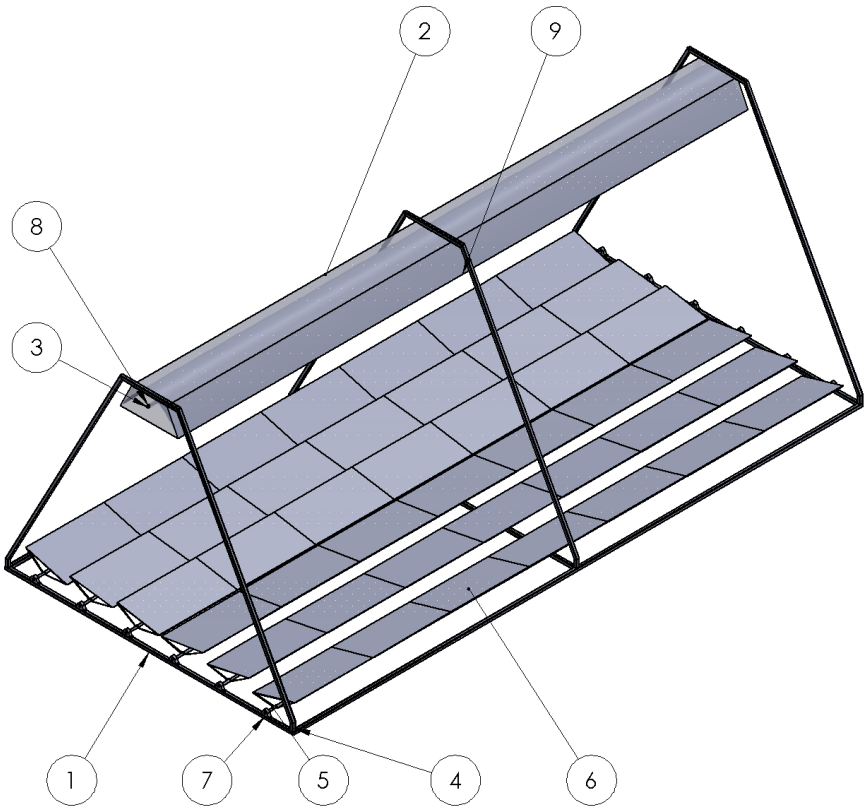
$$\eta = \frac{5343.4\ W}{\left(541.67\frac{W}{m^2}\right)(13.86\ m^2)} = 0.7117$$

Temperatura del fluido

$$T_0 = 30 + \frac{5343.4\ W}{\left(0.0174\frac{kg}{s}\right)\left(4233.1\frac{J}{kg.°C}\right)} = 102.6\ °C$$

ANEXO 9

DISEÑO DE DETALLE: PLANO GENERAL



N.° DE ELEMENTO	N.° DE PIEZA	CANTIDAD
1	Extructura_perfil_40X40X2.6	1
2	Concentrador	1
3	Tubo Colector	1
4	Soporte_perfil_40X40X2.6	3
5	Soporte_espejos	6
6	Espejo	42
7	Chumacera_1_in	12
8	Cubierta_de_vidrio	1
9	Placa_parabolica	1

Universidad Señor de Sipán

Proyecto: COLECTOR SOLAR LINEAL TIPO FRESNEL

Título: LFR-01

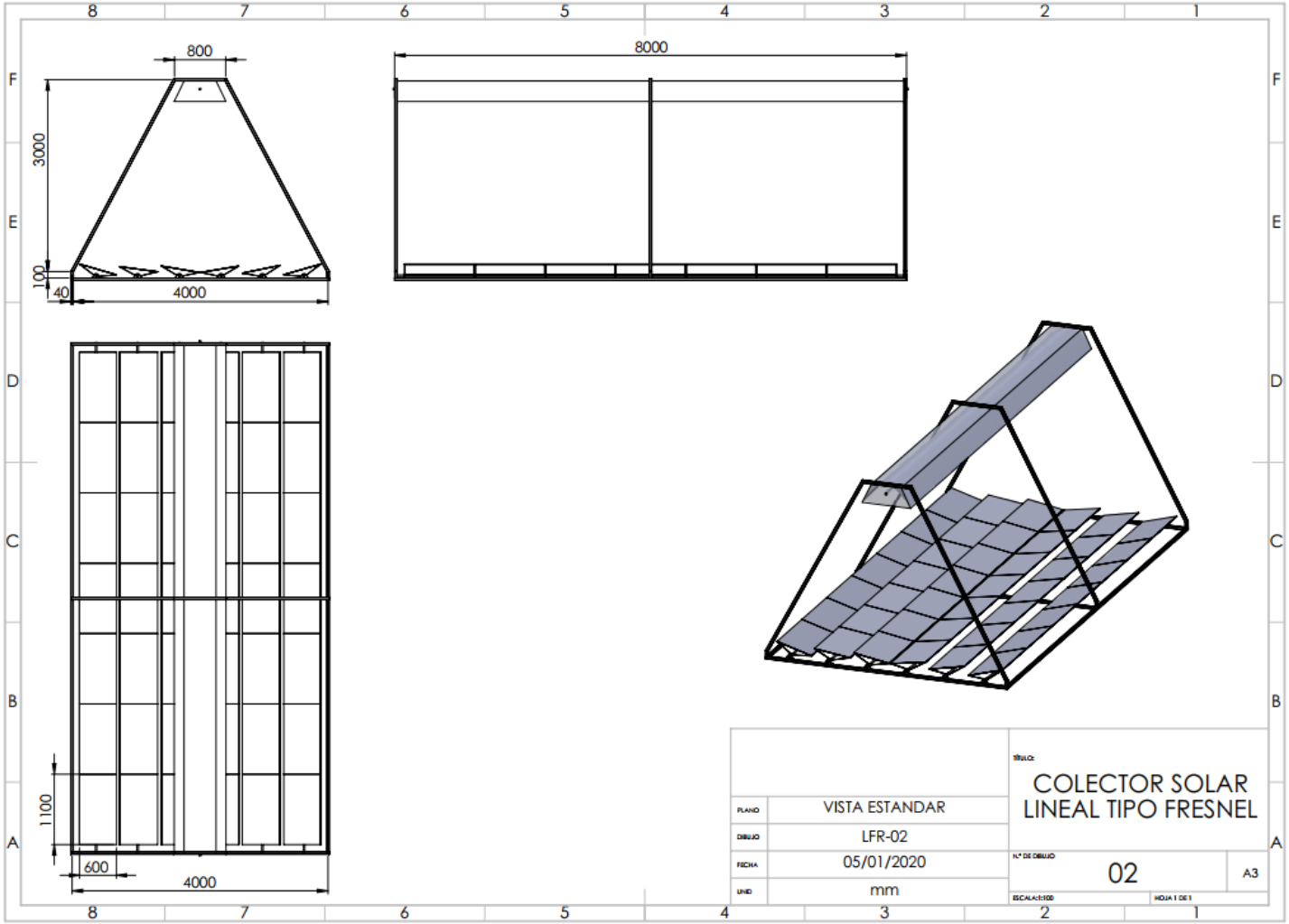
N° de dibujo: 01

ESCALA:1:200

HOJA 1 DE 1

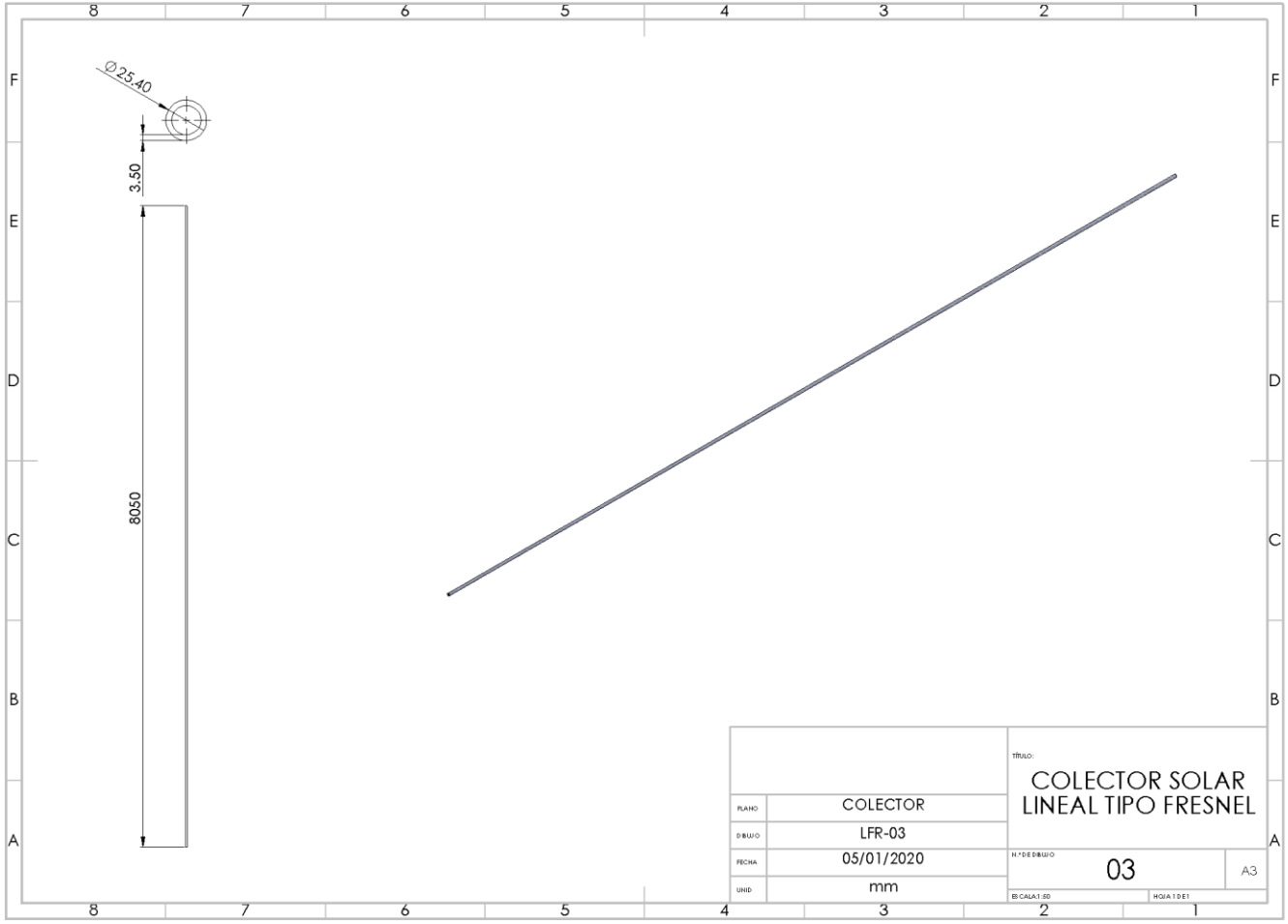
ANEXO 10

DISEÑO DE DETALLE: PLANO VISTA ESTANDAR



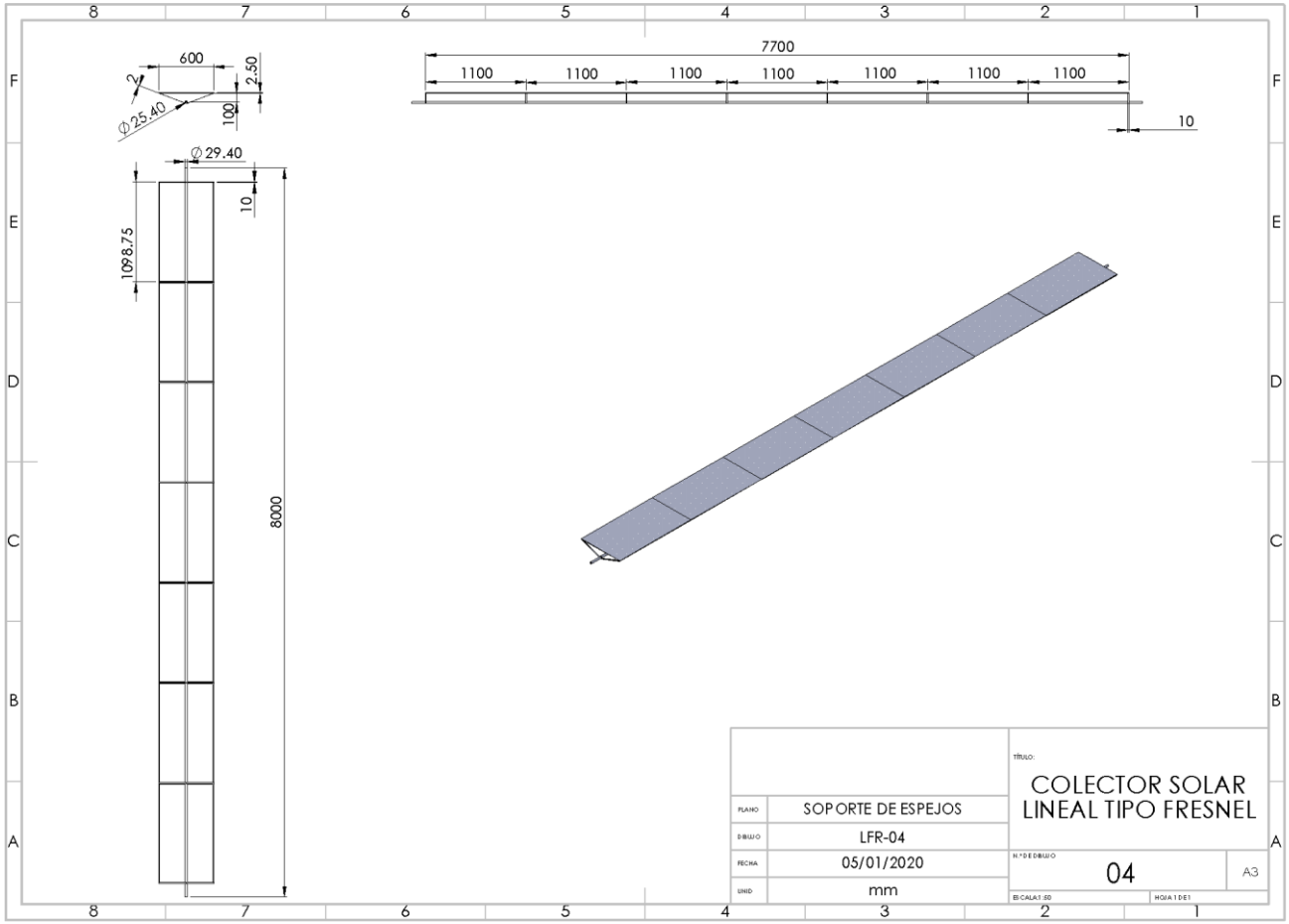
ANEXO 11

DISEÑO DE DETALLE: COLETOR



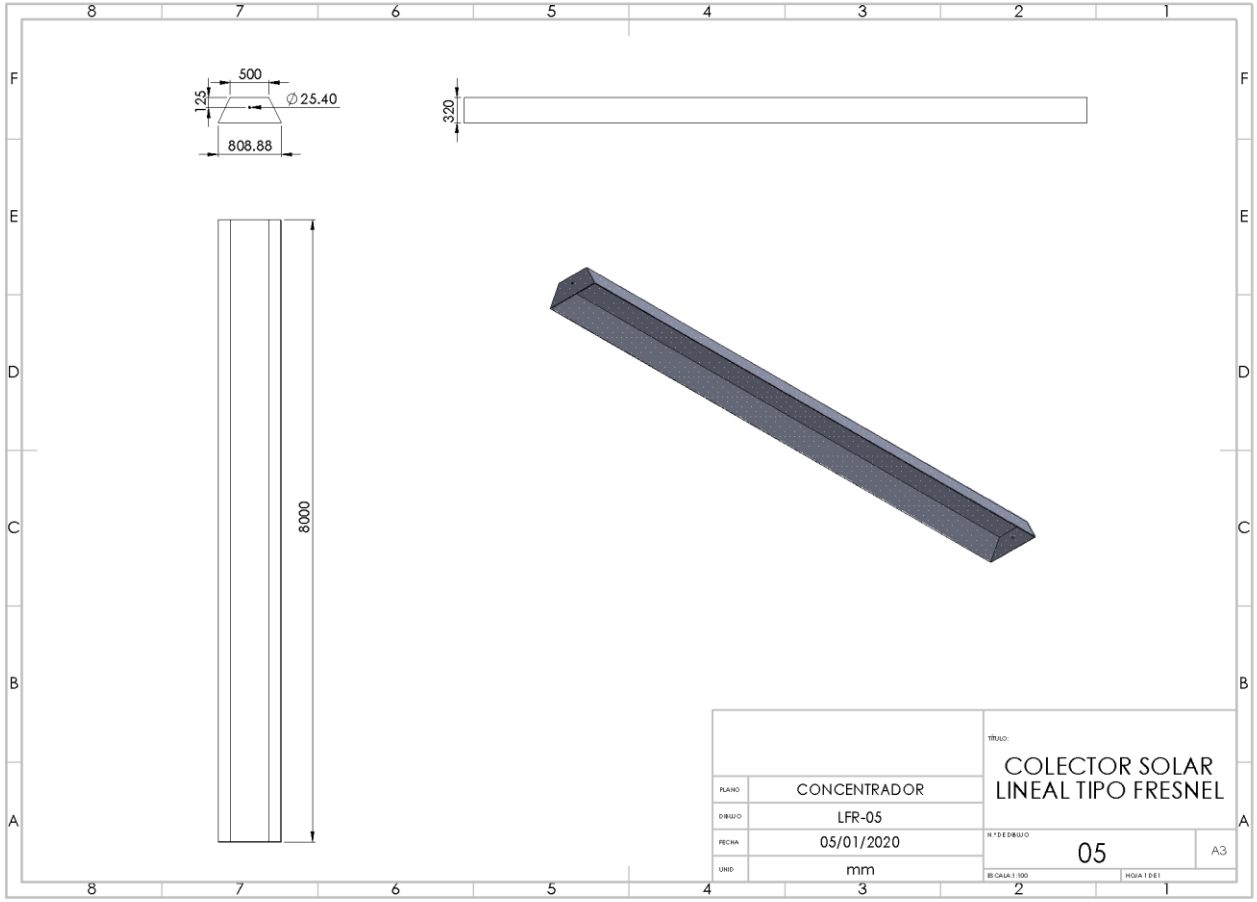
ANEXO 12

DISEÑO DE DETALLE: SOPORTE DE ESPEJOS



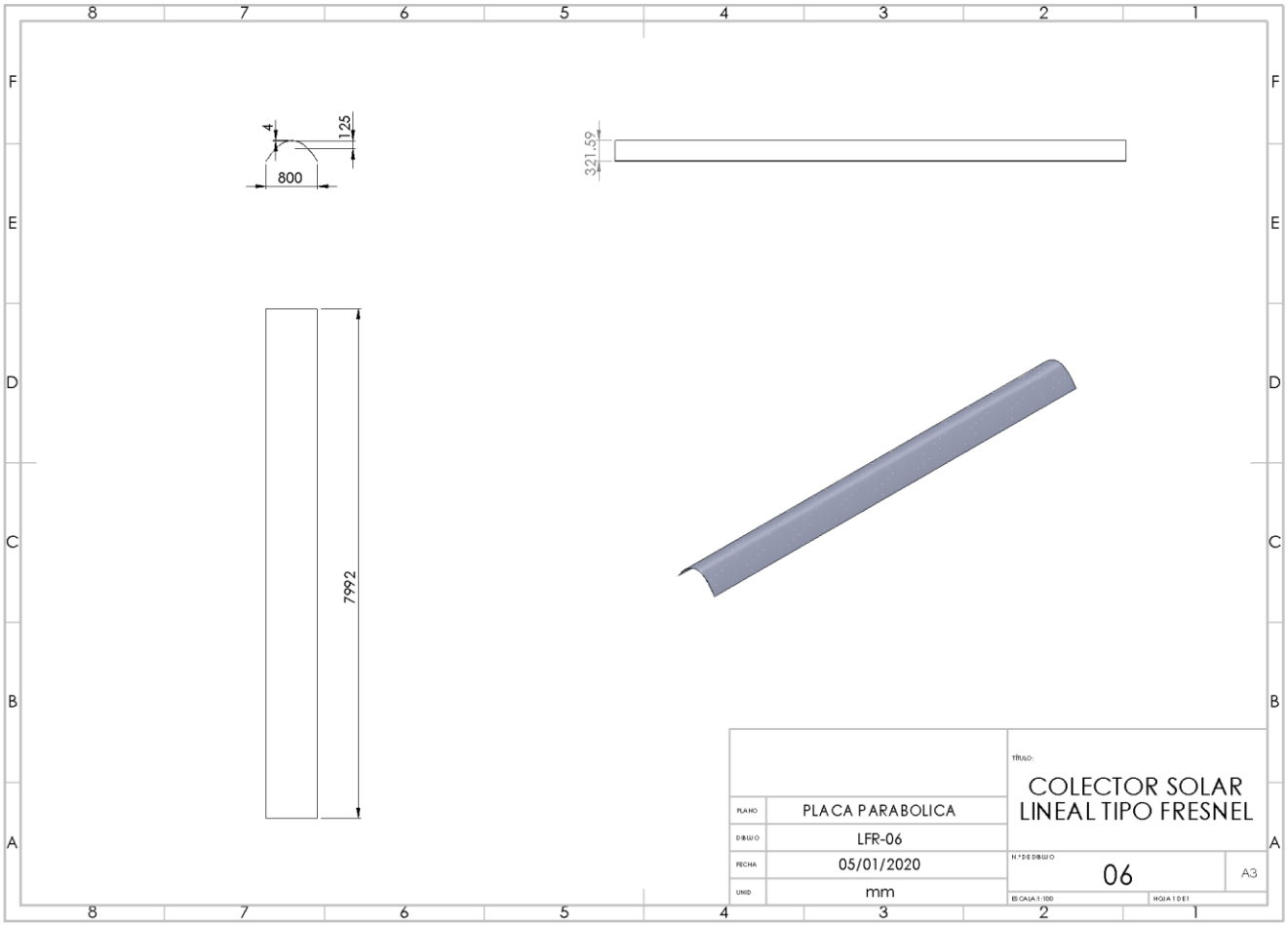
ANEXO 13

DISEÑO DE DETALLE: CONCENTRADOR



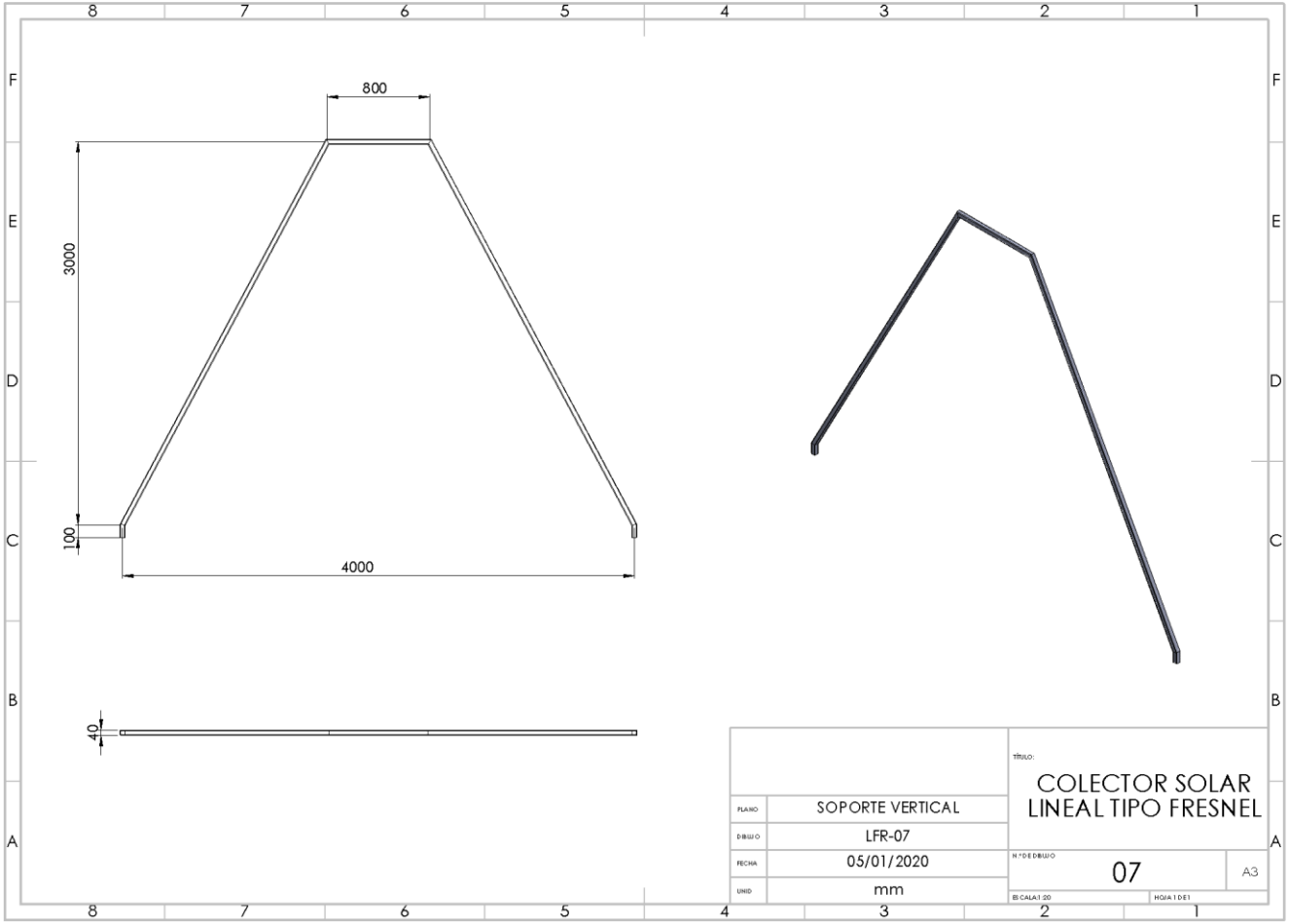
ANEXO 14

DISEÑO DE DETALLE: PLACA PARABOLICA



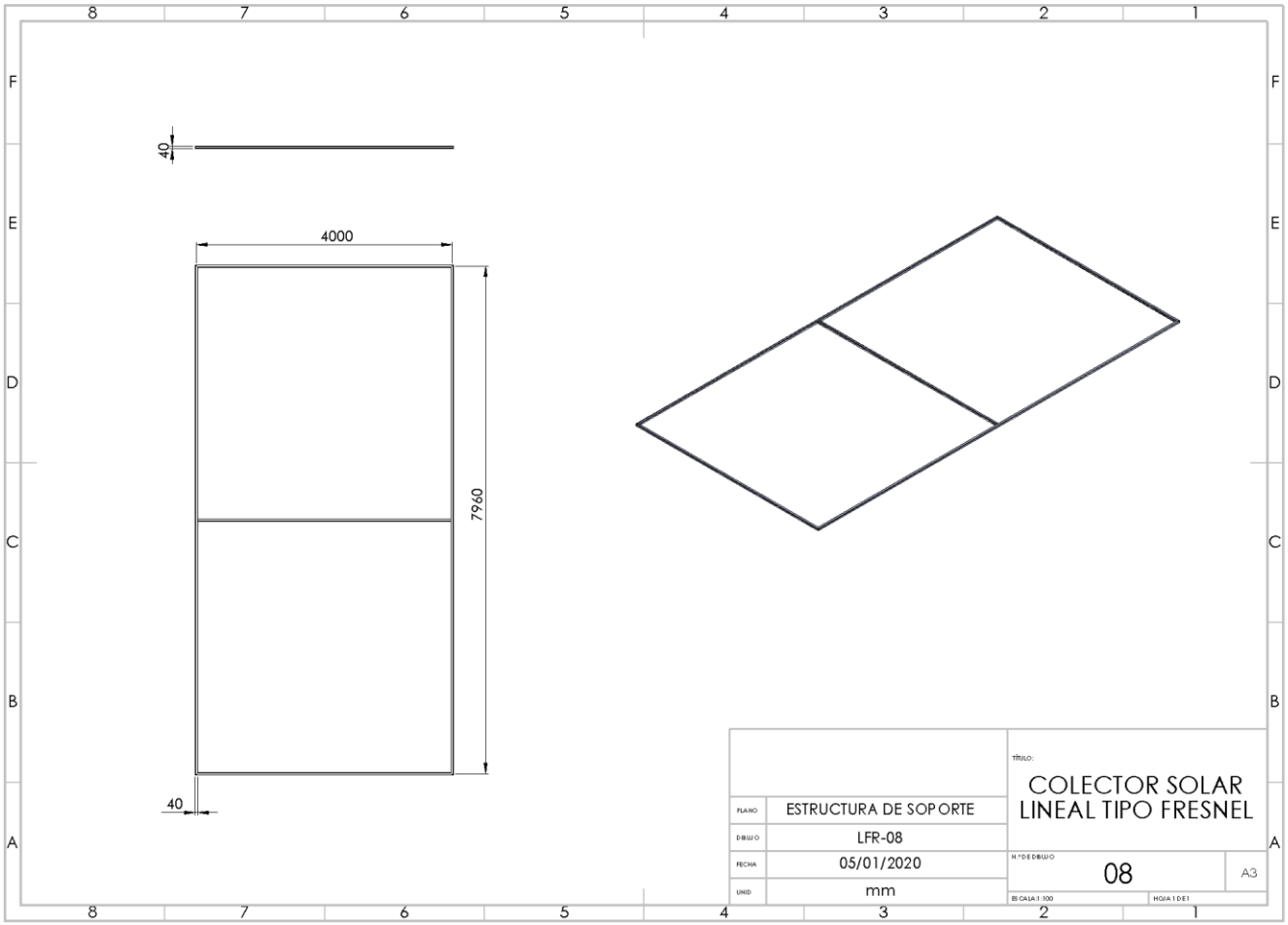
ANEXO 15

DISEÑO DE DETALLE: SOPORTE VERTICAL



ANEXO 16

DISEÑO DE DETALLE: ESTRUCUTRA DE SOPORTE



ANEXO 17

AUTORIZACION PARA EL RECOJO DE INFORMACION

UNIVERSIDAD SEÑOR DE SIPÁN	SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD - USS			
			Código	F-PC-USS
			Versión	00
			Hoja	1 de 1

AUTORIZACION PARA EL RECOJO DE INFORMACION

Chiclayo 19 de febrero de 2020

Quien suscribe:

Mg. Miguel Ángel Solano Cornejo

Director de la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial y Comercio Exterior

Universidad Señor de Sipán

AUTORIZA: Permiso para recojo de información pertinente en función del proyecto de investigación, denominado: DISEÑO DE SISTEMA DE COLECCION SOLAR LINEAL PARA GENERACION DE VAPOR EN LA PLANTA PILOTO DE LA UNIVERSIDAD SEÑOR DE SIPAN – PIMENTEL

Por el presente , el Mg. Miguel Ángel Solano Cornejo Director de la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial y Comercio Exterior - Universidad Señor de Sipán, AUTORIZA al alumno Abanto Díaz Frances André, identificado con DNI: 73991758, respectivamente, estudiante de la escuela profesión de INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA y autor del trabajo de investigación denominado: **DISEÑO DE SISTEMA DE COLECCION SOLAR LINEAL PARA GENERACION DE VAPOR EN LA PLANTA PILOTO DE LA UNIVERSIDAD SEÑOR DE SIPAN – PIMENTEL,** al uso de dicha información que conforma el expediente técnico así como hojas de memorias, cálculos entre otros como planos para efectos exclusivamente académicos de la elaboración de tesis de investigación , enunciada líneas arriba de quien solicita se garantice la absoluta confidencialidad de la información solicitada.

Atentamente.