



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

SISTEMA DE CONCENTRACIÓN SOLAR FRESNEL PARA APLICACIONES  
SOLARES A ESCALA COMUNITARIA  
EVALUACIÓN DE PROTOTIPO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELECTRICO

DANIEL IVÁN FRIEDMAN RAMÍREZ

PROFESOR GUÍA:

RODRIGO PALMA BEHNKE

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

GUILLERMO JIMÉNEZ ESTEVEZ

ALFREDO SCHNELL DRESEL

SANTIAGO DE CHILE

2017

RESUMEN DE LA MEMORIA  
PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA  
POR: DANIEL IVÁN FRIEDMAN RAMIREZ  
FECHA: 2017/01/18  
PROF. GUÍA: SR. RODRIGO PALMA

SISTEMA DE CONCENTRACIÓN SOLAR FRESNEL PARA APLICACIONES SOLARES A  
ESCALA COMUNITARIA  
EVALUACIÓN DE PROTOTIPO

El aumento en las aplicaciones de energías renovables y la proliferación de tecnologías complejas a escala individual utilizando placas de desarrollo como Arduino ha promovido una cultura de comunidad de desarrollo abierto. En el ámbito de energía solar permite la implementación de sistemas de seguimiento solar. Esto mejora significativamente el rendimiento de tecnologías solares desde paneles fotovoltaicos a calefactores de agua.

La investigación preliminar del trabajo resulta en el estudio de un proyecto de una impresora solar 3D que utiliza un lente Fresnel para concentrar la radiación del sol. Esto se puede utilizar en aplicaciones que requieren alta temperatura. Se busca estudiar el rendimiento de un lente de escala individual.

Se realiza el diseño y construcción de una estructura para montar el Fresnel. Al ser una tecnología de concentración requiere seguimiento solar para permanecer perpendicular a la radiación del sol.

La temperatura en el foco se mide para determinar las aplicaciones posibles, resultando en una temperatura máxima de 690 [°C] durante el mes de diciembre. En el foco se concentra la radiación solar 246 veces. Esto resulta en un rango de operación teórico de 340 a 570 [°C] para aplicaciones útiles y un máximo teórico de 755 [°C].

Respecto a la implementación de una impresora solar con el lente se requiere aumentar la concentración y modificar la estructura para permitir una plataforma móvil en el foco. Existen aplicaciones viables en ámbitos de minería artesanal de oro o cocinas solares de escala familiar. El prototipo requiere trabajo adicional para obtener un sistema de seguimiento más robusto capaz de operar sin mantenimiento constante.

*“Light thinks it travels faster than anything but it is wrong. No matter how fast light travels, it finds the darkness has always got there first, and is waiting for it.”*

— Terry Pratchett, *Reaper Man*

**“WHAT CAN THE HARVEST HOPE FOR,  
IF NOT FOR THE CARE OF THE REAPER MAN?”**

**— DEATH**

## Acknowledgments

I'd like to thank my parents, who always prioritized my education, both academic and not. It is due to them that I learned English well enough that it is more comfortable for me to speak it with friends and family. It's why this section is in a different language from the rest of the document. I owe them my taste in fiction and literature, in music and movies, and my interest in science and technology.

I also thank my brother, who for several was a great flatmate despite being on his own journey to get his degree, becoming a doctor over a year ago. Since then he's continued to be one of my best friends, even if we don't see each other quite as often.

Over the years I've been lucky to remain close friends with people I met in school and getting together with them throughout my studies has been an excellent way to remain grounded and give perspective to the work. As important as completing my studies is, the presence of my friends helped me keep in mind that there are other things in life that are worth prioritizing as well.

As I advanced in my studies within this faculty I was accompanied by a group of fellow engineering students, some of which I'm glad to call my friends. The camaraderie of going through year after year of increasingly complex courses was an invaluable support structure and I hope it will remain once we've completed our studies.

During my studies I found people within the university who guided my work. I wanted to work in renewable energy since high school but it wasn't until professor Palma's second year course that I definitively decided to do so through electrical engineering. I am also grateful for professor Román, whose solar energy course was so interesting I briefly considered switching to mechanical engineering. I went to him again looking for solar energy companies and on his advice contacted a company where I worked for two summers which showed me the reality of the work and its feasibility. I also need to thank Vladimir Ovalle, who was instrumental in the construction of the prototype, as well as the three second year students going through professor Palma's course. Their assistance saved considerable time and having to lead them through the work taught me a great deal.

Finally, I'd like to thank the myriad of artists and entertainers who kept me awake through hours of commutes and long nights, whose work lifted me up and helped me stay sane.

## TABLA DE CONTENIDO

1.	Introducción .....	1
1.1	Objetivos .....	2
1.1.1	Objetivos específicos .....	2
1.2	Estructura de la memoria .....	2
2.	Antecedentes generales .....	3
2.1	Contexto.....	3
2.1.1	Territorial .....	3
2.1.2	Población .....	4
2.1.3	Uso Solar en la región .....	5
2.1.4	Consideraciones para diseño .....	6
2.2	Geometría terrestre .....	7
2.2.1	Definiciones .....	7
2.3	Radiación solar .....	9
2.4	Conversión térmica .....	10
2.4.1	Tecnologías de colección.....	12
2.4.2	Aplicaciones térmicas .....	17
2.5	Sistemas adicionales .....	19
2.5.1	Seguimiento solar.....	19
2.5.2	Reflectores adicionales .....	19
2.5.3	Lentes concentradores.....	20
3.	Desarrollo teórico y prototipo .....	23
3.1	Propuesta general .....	23
3.2	Caracterización óptica .....	23
3.3	Características del concentrador .....	24
3.4	Eficiencia térmica.....	28
3.5	Construcción de prototipo .....	30
3.6	Sistema de seguimiento.....	37
3.7	Algoritmo.....	41

3.8	Sistema receptor .....	42
4.	Pruebas realizadas.....	44
4.1	Metodología y objetivos .....	44
4.2	Condiciones locales .....	45
4.3	Resultados .....	47
4.4	Análisis.....	51
5.	Aplicaciones.....	57
5.1	Impresora solar 3D .....	57
5.1.1	Diferencias con "Solar Sinter" .....	57
5.1.2	Implementar una impresora solar .....	59
5.2	Pirquinería .....	59
5.3	Hornos y cocinas solares.....	61
5.4	Conclusión .....	63
6.	Bibliografía .....	66
7.	Anexo A .....	69
8.	Anexo B Código Arduino .....	73

## Figuras

Figura 1	Diagrama de zonas ecológicas [1].....	3
Figura 2	Eficiencia a distintos niveles de radiación [6].....	11
Figura 3	Recursos y tecnologías solares [1] .....	12
Figura 4	Gráfico $R_c$ Temperatura [17].....	13
Figura 5	Colector plan [23].....	14
Figura 6	Colectores de tubo evacuado y funcionamiento [23] .....	15
Figura 7	Colector parabólico [23] .....	15
Figura 8	Colectores disco parabólico [23] .....	16
Figura 9	Torre solar PS10 en España [23] .....	17
Figura 10	Destilador solar [23] .....	18
Figura 11	Lente Fresnel (1) y convencional (2). Funcionamiento original Fresnel [23] .....	21
Figura 12	Lente Fresnel real [27] .....	21
Figura 13	Lente Fresnel .....	24
Figura 14	Lente Fresnel enmarcada .....	25

Figura 15 Segmento de círculo.....	26
Figura 16 Ángulo sustentado.....	27
Figura 17 Área segmento circular [23].....	27
Figura 18 Estructura preexistente .....	30
Figura 19 Corte de cono interno.....	31
Figura 20 Eje cuadrado vacío.....	32
Figura 21 Base reducida      Figura 22 Construcción de eje cuadrado.....	32
Figura 23 Estructura pirámide truncada .....	33
Figura 24 Barras y ranuras para fijar lente .....	33
Figura 25 Lente fijo en ranura.....	34
Figura 26 Contrapeso de prueba .....	34
Figura 27 Contrapeso diseñado.....	35
Figura 28 Contrapeso funcional.....	36
Figura 29 Circuito básico fotosensible .....	37
Figura 30 Fotorresistencia fijado al costado del lente .....	37
Figura 31 Puente H VNH2SP30 [25].....	38
Figura 32 Circuito controlador de motor [28] .....	39
Figura 33 Puente H L298N [25].....	40
Figura 34 Diagrama de flujo de código.....	41
Figura 35 Placa receptora preliminar .....	42
Figura 36 Placa receptora fija .....	43
Figura 37 Ubicación de prueba [26].....	45
Figura 38 Radiación predicha explorador solar [20] .....	45
Figura 39 Datos históricos de radiación.....	46
Figura 40 Prototipo vertical      Figura 41 Prototipo funcionando .....	46
Figura 42 Forma focal irregular.....	47
Figura 43 Medidas de temperatura 2016-08-11 .....	48
Figura 44 Medidas de temperatura y radiación 2016-12-17 .....	49
Figura 45 Barrera de viento.....	50
Figura 46 Foco irregular debido a sombra.....	50
Figura 47 Pérdidas teóricas según medidas de temperatura.....	51
Figura 48 Pérdidas vs Temperatura .....	52
Figura 49 Pérdidas teóricas calculadas con foco irregular.....	53
Figura 50 Potencia en foco vs pérdidas teóricas .....	55
Figura 51 Solar Sinter [19].....	57
Figura 52 Proceso de impresión      Figura 53 Vista cercana de foco [19].....	58
Figura 54 Cuenco impreso por Solar Sinter [19].....	58
Figura 55 Amalgama sólida de mercurio y oro [22] .....	60

Figura 56 Evaporación de mercurio [22] .....	60
Figura 57 Pepas de oro 3-4 cm diámetro [22].....	60
Figura 58 Imagen promocional vendedor Fresnel .....	62
Figura 59 Circuito sensor y arduino .....	69
Figura 60 Fotorresistencias y potenciómetros .....	70
Figura 61 Circuito sensor .....	70
Figura 62 Diagrama de bloques VNH2SP30.....	71
Figura 63 Cadena-catalina horizontal.....	71
Figura 64 Circuito final de control y seguimiento .....	72



# 1. Introducción

El creciente consumo energético de la humanidad y sus efectos sobre el medio ambiente han llevado al desarrollo de fuentes alternativas de energía, tanto para generación eléctrica como para trabajo mecánico.

La abundante radiación solar incidente en el norte del país debido a su latitud y condiciones atmosféricas lo hace un punto de interés para aplicaciones que requieren altos niveles de energía radiante para ser viables.

Un concentrador solar permite obtener temperaturas elevadas que permiten el funcionamiento de sistemas de generación o el reemplazo de sistemas convencionales que generan altas temperaturas utilizando combustibles.

Los sistemas de concentración requieren un sistema de seguimiento solar que mantenga el plano perpendicular a la radiación solar directa para mantener un foco efectivo.

Una lente de Fresnel utiliza una geometría precisa para imitar el funcionamiento de una lente biconvexa (o de lupa) sin requerir un grosor inviable, lo que permite un área de concentración mayor.

Para determinar las aplicaciones viables con un sistema de concentración es necesario determinar la radiación y temperaturas alcanzables en el foco.

Los dos últimos puntos son de interés en esta memoria.

## **1.1 Objetivos**

Esta memoria tiene dos objetivos generales:

- Mostrar la validez de una lente Fresnel como método de concentración solar.
- Determinar la temperatura que se puede alcanzar en el foco y las aplicaciones que esto permite.

### **1.1.1 Objetivos específicos**

Con el fin de alcanzar los objetivos generales de la memoria se establecen los siguientes objetivos específicos:

- Entender la teoría sobre radiación solar y los sistemas de seguimiento.
- Disponer de un sistema de soporte eficiente para fijar el lente.
- Disponer de un sistema de seguimiento solar.
- Medir las temperaturas en el foco y caracterizarla según el marco teórico.
- Determinar aplicaciones posibles según las temperaturas alcanzadas.

## **1.2 Estructura de la memoria**

El capítulo 2 comienza explicando el contexto territorial y cultural en el norte del país. Luego se detallan los conocimientos generales necesarios para cualquier aplicación solar y se presenta una revisión de múltiples tecnologías.

El capítulo 3 contiene el desarrollo teórico, incluyendo la caracterización del sistema, para estimar la radiación incidente al sistema y a la temperatura que se llega. Posteriormente se explica el diseño y construcción del prototipo.

El capítulo 4 detalla los resultados experimentales de las temperaturas en el foco y las radiaciones medidas durante el día. También incluye la comparación teórica y experimental del sistema y predicciones de temperaturas posibles con diferentes niveles de radiación.

El capítulo 5 concluye sobre los resultados y explica trabajos futuros.

## 2. Antecedentes generales

### 2.1 Contexto

El objetivo del trabajo es desarrollar una aplicación solar para la comunidad andina en la zona norte del país. Se encuentra enmarcado dentro de un proyecto mayor del Centro de Energía de la Universidad de Chile que busca impulsar crecimiento sustentable en las regiones de Arica y Parinacota. [1]

#### 2.1.1 Territorial

Primero es importante definir el contexto ecológico de la zona. El territorio se destaca por su diversidad ecosistémica, con una gran variación climática. El rango de altitudes entre la costa y la Cordillera de los Andes permiten la existencia de múltiples zonas ecológicas. Se diferencian principalmente en:

- Costa
- Desierto, incluyendo planicies y quebradas. En esta zona se encuentran los cuatro valles fértiles principales.
- Precordillera (o Sierra)
- Altiplano (o Puna), incluyendo planicies sobre 3700 metros que vierten al lado este de los Andes.



Figura 1 Diagrama de zonas ecológicas [1]

Dentro de las zonas ecológicas, el grupo de trabajo del Centro de Energía identifica unidades territoriales que consideran también la ocupación humana para caracterizar ubicaciones donde se realiza un análisis específico del potencial de cada comunidad. Esto permite producir propuestas solares diseñadas para las condiciones locales.

### **2.1.2 Población**

La única zona de desarrollo urbano en la región es la ciudad de Arica, que concentra el 97,7% de la población de la región. El resto de las localidades son rurales con actividades agrícolas, ganaderas y potencial turístico.

La actividad pesquera se realiza de manera artesanal en el puerto de Caleta Camarones. El puerto de la ciudad de Arica es un importante puerto de transporte internacional donde también se realiza la pesca de manera industrial.

La población de la región presenta un alto grado de movilidad, con una tradición de intercambio proveniente de las culturas Aymara e Inca, dominantes previo a la colonización española. Desde la segunda mitad del siglo pasado, los procesos de migración se han exacerbado debido al desarrollo económico de las ciudades costeras, produciendo un abandono de las zonas rurales. La movilidad se diferencia de la migración en que la población se desplaza entre comunidades de manera regular en ambas direcciones.

Entre la ciudad de Arica y las localidades interiores se tienen dos niveles de movilidad. La movilidad diaria ocurre en torno a las comunidades rurales donde los pobladores viajan al extenso territorio productivo donde realizan su labor y vuelven por la noche a dormir. Esto produce un consumo eléctrico diurno reducido dentro de la localidad y un consumo importante en las zonas productivas durante el día. El segundo nivel de movilidad es semanal o mensual, correspondiente a la población flotante de las principales localidades interiores, incluyendo una parte importante de los trabajadores en servicios públicos, que vuelve a Arica durante los fines de semana. También se tienen habitantes que emigraron hacia Arica que vuelven a las localidades interiores para visitar y participar de instancias comunitarias.

En la región completa se reconoce movilidad estacional, donde durante fechas puntuales, en particular celebraciones religiosas y fiestas tradicionales, se pueden concentrar más de 20 mil personas en localidades de 100 habitantes

permanentes. Se destaca la importancia de estas fiestas como fuentes de cohesión y referente de identidad regional.

En el aspecto cultural de la región, uno de los principales elementos es el autoreconocimiento Aymara, particularmente en las zonas de precordillera y altiplano. Esto tiene un impacto sobre la visión de la energía solar, pues en el sistema de creencias tradicionales el Sol (*Willka* en Aymara) es concebido como la deidad que junto a la Pachamama es fuente de la vida.

Dentro de la región hay considerable conciencia de las tecnologías solares, con una opinión positiva de las tecnologías de paneles fotovoltaicos y colectores térmicos. Se destaca el trabajo de académicos de la Universidad de Tarapacá que han implementado proyectos solares desde los años ochenta. Las tecnologías pasivas como hornos y cocinas solares también son conocidas, aunque no se consideran sustitutos factibles al uso de combustibles como el gas licuado y la leña.

### **2.1.3 Uso Solar en la región**

Como parte del trabajo del Centro de Energía se realiza un catastro de los distintos proyectos y aplicaciones solares, recopilando información de 80 distintas instalaciones. La tecnología solar de mayor penetración en los territorios rurales es la electrificación mediante sistemas fotovoltaicos aislados. De los 21 proyectos, 19 son sistemas de pequeña escala para energizar escuelas debido a su importancia social en comunidades aisladas. Algunas de las instalaciones presentan problemas debido a falta de mantenimiento o condiciones ambientales.

Se encuentra también un número de proyectos fotovoltaicos de mayor envergadura, con un potencial instalado en los próximos años de 574 MW. Otras aplicaciones fotovoltaicas que destacan alimentan servicios públicos y sistemas de recepción satelital de Entel. Las plantas fotovoltaicas grandes y pequeñas corresponden a 17 proyectos.

En las zonas más aisladas la tecnología de agua caliente sanitaria tiene un papel importante para mejorar la calidad de vida. Muchas de estas instalaciones son financiadas por instituciones públicas, incluyendo el ministerio de Medio Ambiente.

La mayoría de la luminaria fotovoltaica se encuentra en sectores rurales, particularmente la comuna de Putre, donde la mayoría presenta problemas y no funciona adecuadamente.

Una tecnología cuyo nivel de penetración es deficiente es el tratamiento y desalación de agua con energía solar. Sólo hay dos aplicaciones instaladas y de ellas sólo una está operativa. En los valles donde el agua es de mala calidad hay un gran potencial de desarrollo que beneficiaría a todos los habitantes, tanto para su uso personal como en la industria agricultora.

16 proyectos de los estudiados son aplicaciones de bombeo de agua para la producción agrícola. Se distinguen los sistemas grandes ubicados en los valles con los de pequeña escala en localidades precordilleranas.

Del catastro en general se determina que la mayoría de las aplicaciones solares son para uso no productivo económicamente. El uso de electrificación rural es popular debido a la dificultad de conectarse al SING en las zonas rurales.

#### **2.1.4 Consideraciones para diseño**

El estudio de los diversos terrenos de la región permite determinar características importantes para considerar durante el diseño de sistemas:

- Temperatura: Se tiene una variación térmica diaria alta tanto en el desierto como en el altiplano donde se llegan a mínimos de  $-20^{\circ}\text{C}$ . Este fenómeno no ocurre en la costa que tiene las temperaturas más estables del país.
- Tormentas eléctricas: El fenómeno del invierno altiplánico incluye fuertes tormentas eléctricas que requieren estudiar la necesidad de un sistema pararrayos en la instalación.
- Polvo y material particulado: Incrementa las necesidades de mantención y limpieza.
- Salinidad: En el sector costero hay mayor proporción de sales en el aire y el agua en la región suele tener altas concentraciones de sales minerales que afectan la vida útil de elementos metálicos o electrónicos.
- Población variable: Hay importantes variaciones demográficas durante fiestas patronales y durante periodos específicos del año.

## 2.2 Geometría terrestre

El planeta se divide en paralelos, que definen latitud ( $\varphi$ ). El hemisferio norte tiene latitud positiva definida entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ , con el hemisferio sur de  $0^\circ$  a  $-90^\circ$  y latitud negativa. El paralelo de  $0^\circ$  se llama ecuador terrestre.

El segundo parámetro para definir un punto sobre la superficie es la longitud, dada por meridianos de polo norte a sur. Se define como meridiano  $0^\circ$  el que pasa por Greenwich, Inglaterra. Los meridianos aumentan hasta  $180^\circ$  de este a oeste.

### 2.2.1 Definiciones

La lista siguiente detalla conceptos utilizados en las fórmulas siguientes.

- a) Radiación difusa: Radiación solar incidente proveniente de la dispersión en la atmósfera. Las unidades son de  $W/m^2$ .
- b) Radiación directa: Radiación solar incidente en el vector original proveniente del sol. Las unidades son de  $W/m^2$ .
- c) Radiación reflejada: Radiación solar reflejada por la superficie terrestre. Las unidades son de  $W/m^2$ .
- d) Radiación total: Es la suma de las radiaciones directa, difusa y reflejada.
- e) Zenit: Corresponde a la línea perpendicular al plano horizontal en el punto de observación.
- f) Ángulo zenit ( $\theta$ ): Ángulo subtendido entre el Zenit, el punto de observación y la línea de vista del sol.
- g) Latitud ( $\varphi$ ): Posición angular definida respecto al ecuador.
- h) Declinación solar ( $\delta$ ): Posición angular del sol a mediodía respecto al plano del ecuador. Se define en el rango  $[-23,45^\circ, 23,45^\circ]$  con el norte siendo positivo. La declinación solar para un día cualquiera se define a partir del día juliano para el solsticio de verano en el hemisferio norte, con un valor de  $d_{sv} = 173$ , y la inclinación del eje terrestre respecto al plano orbital de  $23,45^\circ$ .

$$\delta = 23,45 * \cos\left(\frac{2 * \pi * (d - d_{sv})}{365,25}\right) \quad [^\circ] \quad (1)$$

- i) Inclinación ( $\beta$ ): Ángulo definido por la superficie a estudiar y el plano horizontal.

- j) Ángulo de azimut solar ( $\gamma_s$ ): Ángulo formado por la proyección sobre el plano horizontal del rayo solar. Se define en un rango de  $[-180^\circ, 180^\circ]$  con oeste siendo positivo y norte siendo  $0^\circ$ .
- k) Ángulo de azimut superficial ( $\gamma$ ): Ángulo de desviación de la superficie respecto al meridiano local. Se define con la proyección horizontal de la normal a la superficie. El ángulo es  $0^\circ$  cuando la proyección apunta al norte, en un rango de  $[-180^\circ, 180^\circ]$  con oeste siendo positivo.
- l) Ángulo de hora solar ( $\omega$ ): Corresponde a la posición angular del sol, con un desplazamiento debido a la rotación de la tierra a  $15^\circ$  por hora. Se define  $0^\circ$  a mediodía, negativo durante la mañana y positivo durante la tarde.
- m) Ángulo de incidencia ( $\theta_i$ ): Ángulo entre el haz de radiación directa y la normal a la superficie. Para superficies horizontales, el ángulo de incidencia es igual al ángulo de zenit del sol, que se calcula como

$$\cos(\theta) = \cos(\delta) \cos(\phi) \cos(\omega) + \sin(\delta) \sin(\phi) \quad (2)$$

- n) Tiempo solar: Para determinar el ángulo  $\omega$  se utiliza el tiempo solar donde el medio día ocurre cuando el sol cruza el meridiano local. Esto no coincide con el tiempo local por lo que se aplican factores de corrección. El primer factor corresponde a la diferencia entre la longitud del observador y el meridiano en el que se basa la hora local. El segundo factor corrige el hecho que la velocidad angular del sol no es constante durante el año.

$$h_s = h_l[\text{hr}] + E[\text{min}] - 40 [\text{min}] \quad (3)$$

Con

$h_s$  : Hora solar

$h_l$  : Hora local

E: Ecuación de tiempo en minutos.

$$E = 9,87 \sin(2B) - 7,53 \cos(B) - 1,5 \sin(B) \quad (4)$$

$$B = \frac{360(d - 81)}{364} \quad (5)$$



## 2.3 Radiación solar

A la Tierra llega radiación proveniente del Sol, una estrella cuya temperatura superficial es de 5.800 [K], con un diámetro de  $13,9 * 10^5$  kilómetros. La energía irradiada proviene de reacciones nucleares que ocurren en el núcleo de la estrella donde la temperatura es considerablemente mayor, de 15.600.000 [K], fusionando  $6 * 10^{14}$  kilogramos de hidrógeno por segundo. Esta masa se convierte a energía según la expresión  $e = m * c^2$ , que se transporta a la superficie a través de difusión radiativa y convección. La cantidad de hidrógeno en el núcleo es suficiente para continuar emitiendo por 5 mil millones de años por lo que el flujo radiativo emitido se considera constante para el diseño de proyectos.<sup>[2]</sup>

El Sol emite ondas electromagnéticas que viajan en promedio 149.600.000 kilómetros hacia la Tierra, llegando con una densidad de potencia radiativa media de 1381  $[\frac{W}{m^2}]$  distribuida a lo largo del espectro de frecuencia. La atmósfera absorbe una porción de los fotones, convirtiendo su energía en calor, y refleja otra porción. A la superficie terrestre la densidad de radiación que llega depende de las condiciones locales pero se promedia utilizando un espectro a nivel de mar bajo condiciones estándar de presión, atmósfera y humedad llegando a un valor de 1000  $[\frac{W}{m^2}]$  para el mediodía solar, es decir cuando el sol incide perpendicularmente sobre la superficie.

Para evaluar el potencial solar de una ubicación se utilizan ecuaciones simples que consideran la latitud, fecha, hora y las condiciones atmosféricas. Esto se considera con el ángulo cenital  $\theta$  y el factor de transmisión de la atmósfera  $T_N$ .

$$G_s = G_0 * \cos(\theta) * T_N [W/m^2] \quad (6)$$

Donde  $G_s$  es la densidad de flujo radiativo en la superficie,  $G_0$  la densidad de radiación que llega al exterior de la atmósfera terrestre.

Los niveles de radiación en el país se encuentran registrados históricamente. En Calama durante el mes de noviembre se llegan a niveles de 1042  $[\frac{W}{m^2}]$ , con 8% correspondiendo a radiación difusa para una superficie horizontal. En junio esta radiación disminuye a 750  $[\frac{W}{m^2}]$  con la radiación difusa incrementando a 10%. Una evaluación de la componente directa muestra una caída de 30% entre las dos fechas.

En la capital del país los niveles llegan a 735  $[\frac{W}{m^2}]$  durante noviembre con 10% de componente difusa. En el mes de junio esto disminuye a 350  $[\frac{W}{m^2}]$ , con un

20% correspondiente a la radiación difusa. Esto resulta en una radiación directa 58% menor durante invierno, una diferencia relativa mayor que en la zona norte del país. Debido a las condiciones atmosféricas, los altos niveles de radiación en verano también son más pronunciados.

## 2.4 Conversión térmica

Todos los sistemas solares térmicos están basados en principios y ecuaciones básicas. A continuación se muestran las condiciones en régimen permanente, cuando los sistemas han llegado al equilibrio, bajo condiciones de radiación constante y capacidad térmica baja. [6]

El principio básico de un sistema térmico es una superficie receptora. El receptor, una vez caliente, intercambia calor con el ambiente por radiación, convección y conducción. A mayor diferencial de temperatura, mayor es el flujo de calor de pérdida. En equilibrio se tiene:

$$\alpha * \tau * G = Q_{\text{cond}} + Q_{\text{conv}} + Q_{\text{rad}} + G_{\text{util}} \quad (7)$$

Con  $G$  siendo la radiación incidente, con  $\alpha * \tau$  siendo el cociente de absorción y transmisión de la radiación solar. Si se utiliza un reflector se incorpora el coeficiente de reflexión  $\rho$  del material.

Las pérdidas térmicas del sistema son funciones de la diferencia de temperatura entre el conjunto y el ambiente y del diseño del sistema. La energía útil en cambio depende principalmente de la radiación incidente, siendo lo que resta luego de las pérdidas en régimen permanente.

Se destaca la importancia de una superficie transparente que reduce significativamente las pérdidas por convección y radiación, lo que permite alcanzar mayores temperaturas. Si se aísla el fondo y costados del sistema también se reducen las pérdidas por conducción. Con un diseño aislado apropiadamente, el mecanismo dominante de pérdidas resulta ser la radiación.

Esto resulta en que el rendimiento de un colector térmico, por ejemplo, es una función de la temperatura de operación y de la intensidad de la radiación incidente. Es decir que para una temperatura dada, un nivel de radiación menor resulta en una pérdida importante de eficiencia.

La figura siguiente muestra el rendimiento según la diferencia de temperatura de distintos modelos de colectores solares usando múltiples niveles de tecnología para niveles de radiación de  $1000 \left[ \frac{W}{m^2} \right]$  y  $500 \left[ \frac{W}{m^2} \right]$ .

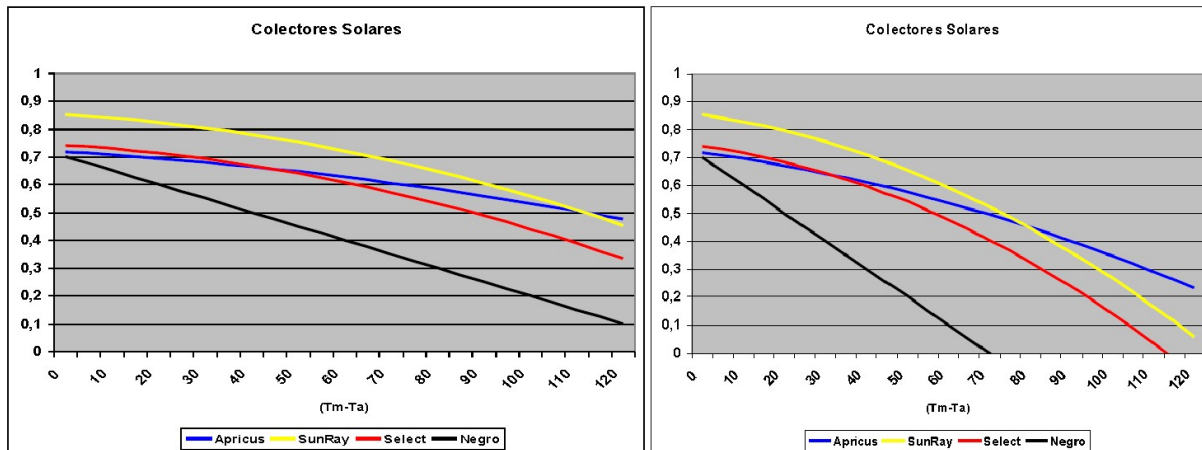


Figura 2 Eficiencia a distintos niveles de radiación [6]

Se aprecia la diferencia con un sistema fotovoltaico donde la eficiencia es similar para distintos niveles de radiación.

Un valor general de radiación global incidente en la zona norte del país es de  $1000 \left[ \frac{W}{m^2} \right]$  en comparación a los  $600 \left[ \frac{W}{m^2} \right]$  para la región metropolitana. Esto resulta en energía disponible en torno a los  $8 \left[ \frac{kWh}{m^2 \cdot día} \right]$  para un sistema con seguimiento y de 3 a  $5 \left[ \frac{kWh}{m^2 \cdot día} \right]$  para un sistema de plano inclinado, dependiendo de si es un día de verano o invierno.

### 2.4.1 Tecnologías de colección



Figura 3 Recursos y tecnologías solares [1]

A excepción de la energía nuclear, geotérmica y mareomotriz, todo tipo de energía proviene de la radiación solar. Desde combustibles fósiles hasta corrientes de viento, la fuente original del proceso es el sol, con procesos almacenando la energía en enlaces químicos, en diferencias de temperatura o cambios de estado.

Métodos más directos para aprovechar el recurso solar usualmente se enfocan en producir energía eléctrica, ya sea por el efecto fotoeléctrico en paneles fotovoltaicos o acumulando calor para un ciclo de generación similar al de las centrales térmicas.

Se distinguen dos tipos de colectores solares según el uso de sistemas de concentración. Los colectores que concentran se pueden caracterizar según la razón entre dos superficies: El área de intercepción  $A_i$  y de absorción  $A_a$ . Con estas áreas se define la razón de concentración  $R_c$ .

$$R_c = A_i/A_a \tag{8}$$

Esta razón permite clasificar sistemas de colección. Dependiendo de la tecnología, los límites teóricos fluctúan entre 200 para sistemas que concentran sobre líneas o tubos donde fluye líquido de trabajo, hasta 45000 para estructuras que concentran sobre un punto. Los resultados reales son considerablemente

menores, particularmente en concentración puntual debido a limitaciones de materiales.

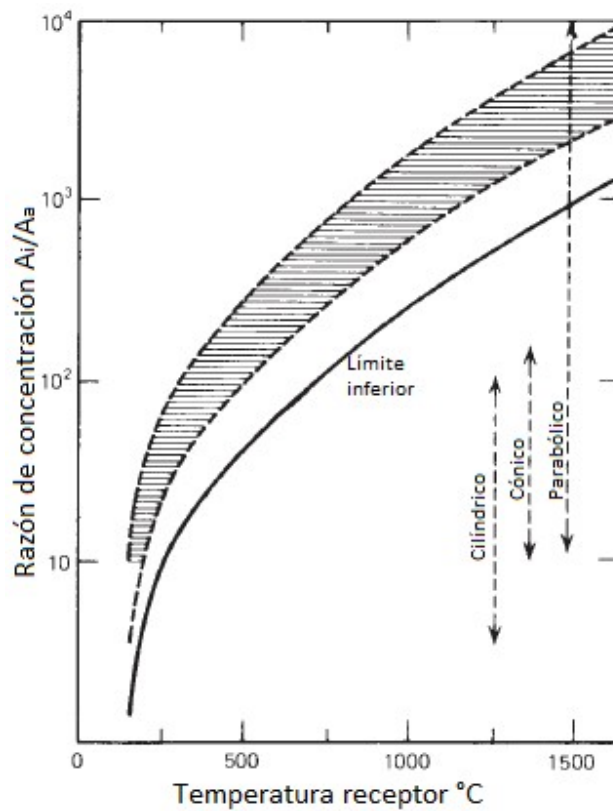


Figura 4 Gráfico Rc Temperatura [17]

El gráfico muestra la relación general entre la razón de concentración y los rangos de temperatura de funcionamiento con una referencia a distintos métodos y tecnologías de concentración detallados a continuación.

La curva de límite inferior representa un receptor que emite toda la energía incidente como pérdidas térmicas, representando un cuerpo negro ideal.

Para la conversión de la energía solar en energía térmica, se distinguen múltiples tecnologías. El tipo de sistema más antiguo y por tanto más maduro es el sistema de colectores planos. Es un sistema estático con una superficie absorbente negra o selectiva. Los módulos suelen variar entre 1 a 2,5  $\text{m}^2$  de superficie.

La radiación solar pasa a través de una cobertura transparente que separa la superficie absorbente del medio ambiente y reduce las pérdidas térmicas por convección. Es de particular importancia que la cobertura sea opaca a la radiación emitida por la superficie de absorción, provocando un efecto invernadero. Esto eleva la temperatura dentro del colector, transfiriendo la energía al líquido de

trabajo, usualmente agua que se almacena para uso futuro. La eficiencia del sistema se aumenta con aislante en los costados.

Esta tecnología es fija, orientada al norte - en el hemisferio sur - y con una inclinación que aumenta la radiación incidente comparado con una superficie horizontal.

Hay productos disponibles en el mercado en una amplia gama de precios y diseños. Módulos de uso doméstico para sistemas de agua caliente sanitaria varían entre 200 y 800 mil pesos sin considerar la instalación. Son utilizados en un rango de aplicaciones, desde sistemas en domicilios privados hasta sistemas industriales. Su diseño puede ser modificado para considerar rangos más extremos de temperatura, con el sistema usual permitiendo una diferencia de 20 a 40 °C con el ambiente.



Figura 5 Colector plan [23]

Los colectores de tubo evacuado son una tecnología cuyas principales ventajas ocurren bajo poca radiación solar, es decir en climas nublados o durante los periodos de invierno. Se debe considerar la posibilidad de sobrecalentamiento en verano. Los precios más bajos son para los módulos fabricados en China, donde pueden ser económicamente competitivos con los colectores planos. Es importante obtener datos reales de funcionamiento de los módulos pues la calidad de fabricación varía significativamente.



Figura 6 Colectores de tubo evacuado y funcionamiento [23]

Otras tecnologías consideradas utilizan sistemas de concentración. Las principales ventajas en comparación a los colectores planos son que obtienen temperaturas mayores con la misma superficie instalada lo que permite obtener mayor eficiencia termodinámica.

Estos sistemas también presentan desventajas claras. Sólo utilizan la componente directa de la radiación incidente por lo que requieren la implementación de un sistema de seguimiento solar. El sistema de concentración, ya sea por reflexión o refracción, puede perder funcionamiento con el tiempo por lo que requiere mayor mantención.

Una opción es el uso de superficies parabólicas cubiertas de material reflectante que redirigen la radiación a un tubo receptor en el foco. Similarmente a los colectores planos, el receptor se recubre de un material transparente, usualmente vidrio, que reduce pérdidas térmicas en torno a la superficie absorbente, usualmente un tubo metálico negro.

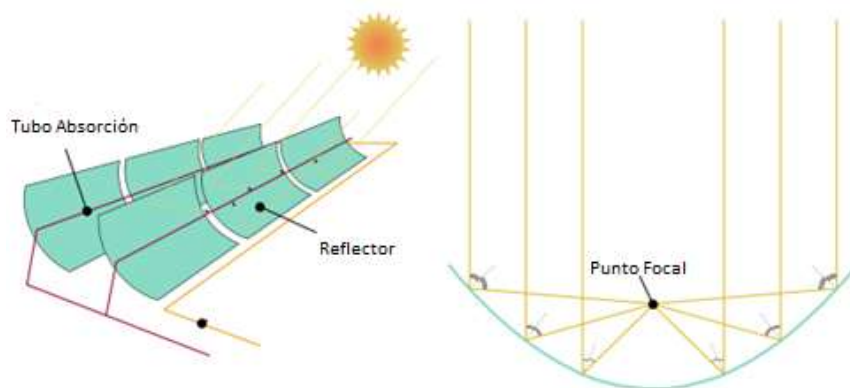


Figura 7 Colector parabólico [23]



La parábola redirige al foco la radiación directa por lo que requiere un sistema de seguimiento solar. El uso de un foco lineal significa que sólo se utiliza seguimiento en un eje, con el movimiento este a oeste del sol.

La tecnología de colectores cilindro parabólicos con seguimiento activo trabaja a mayor eficiencia para temperaturas superiores a los 100°C, logrando hasta 400°C. Se utilizan en aplicaciones de generación eléctrica, calentando fluidos de alto calor específico que luego alimentan un ciclo de vapor turbinado a través de intercambiadores de calor.

Si se tiene un sistema de control activo se puede regular su producción, reduciendo la producción en momentos donde no se requiere energía. El beneficio de un sistema de seguimiento es un rendimiento entre 50 y 100% mayor por metro cuadrado que un colector plano.

Para utilizar un sistema de seguimiento en dos ejes existe la tecnología de disco parabólico, que utiliza un punto focal en vez de un sistema de tuberías focales. Esto produce razones de concentración entre 600 y 2000, lo que permite que la temperatura en el receptor puede sobrepasar los 1500 °C. Al ser receptores puntuales, cada colector puede ser operado de manera independiente, permitiendo regular la producción del campo en su totalidad.



Figura 8 Colectores disco parabólico [23]

Otra tecnología que permite una gran área de incidencia es la torre solar o heliostato, donde se disponen espejos con seguimiento en dos ejes que reflejan la luz a un foco común.





Figura 9 Torre solar PS10 en España [23]

## 2.4.2 Aplicaciones térmicas

Una idea antigua que continúa siendo desarrollada activamente es el uso de energía solar para calentar agua. Para producir agua caliente sanitaria la principal característica es el uso de almacenamiento, para utilizar la energía incidente durante el día para calentar agua que se utiliza en periodos específicos.

En los sistemas modernos se prefiere un sistema indirecto donde el fluido que circula por el colector no es el agua caliente sanitaria, para evitar el riesgo de que el agua se congele dentro del colector y lo dañe. Los sistemas de calentamiento de agua también pueden ser utilizados para calefacción de espacios internos, usando radiadores dentro del recinto.

Otra aplicación térmica es el calentamiento de fluidos industriales. En el norte del país se utiliza en instalaciones mineras para mantener estable la temperatura de los baños químicos necesarios para la extracción de cobre.

Una aplicación que vale la pena detallar más es la tecnología de destilación solar, debido a su potencial de aplicación en la zona norte del país. En particular se puede utilizar para desalinizar agua salada o mejorar la calidad de agua con alto contenido de sales minerales u otros contaminantes. Se destaca que para realizar un proceso de destilación no se requiere hervir el agua. Simplemente elevar la temperatura incrementa la tasa de evaporación apreciablemente. Este proceso entonces requiere de entrada un flujo de calor. [7]

El principio de funcionamiento es que la energía solar calienta el fluido, lo que produce evaporación. El vapor de agua luego condensa sobre una superficie colectora, usualmente la superficie transparente, que luego permite su colección. Este proceso separa el agua de sales, organismos y metales pesados en solución.

Es un proceso pasivo que puede considerar elementos activos para mejorar el proceso.

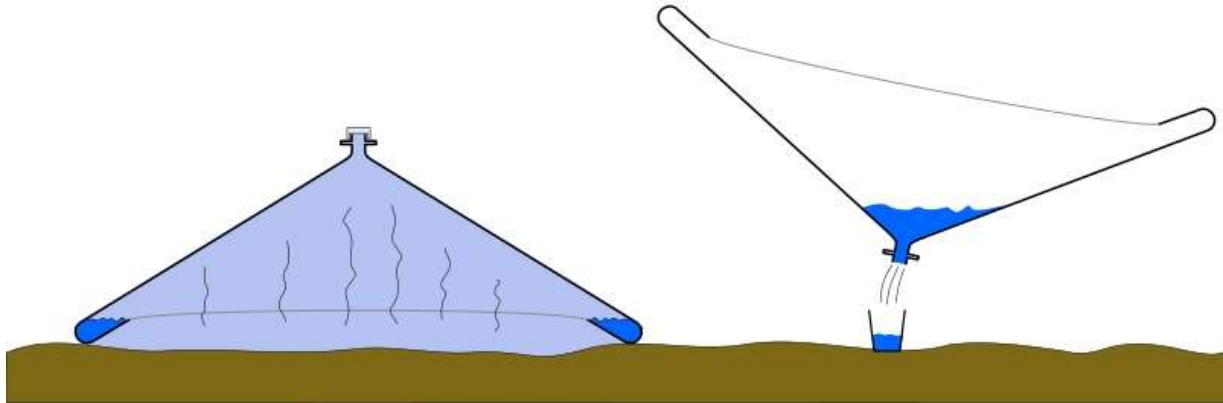


Figura 10 Destilador solar [23]

A diferencia de otros métodos de purificación, el proceso de destilación extrae el agua a través de procesos de cambio de estado. Elementos con temperaturas de ebullición mayores que el agua son separados del líquido, resultando en agua con muchas menos sustancias en solución.

Un sistema de destilación, gracias a su simplicidad de funcionamiento, tiene un diseño fácilmente modificable, lo que permite sistemas modulares, móviles y portátiles. Si se sabe que la instalación es permanente se puede tomar en cuenta la geografía local para maximizar el rendimiento, agregando reservorios de colección que incrementan la producción del sistema simple de la figura en torno a un 30%. También se pueden implementar los sistemas de mejoramiento mencionados a continuación.

## **2.5 Sistemas adicionales**

### **2.5.1 Seguimiento solar**

Para maximizar la radiación directa incidente en un receptor es necesario mantener el área incidente perpendicular a los rayos solares. Esto requiere la implementación de un sistema de seguimiento confiable. Usualmente en sistemas de generación de escala industrial se implementa seguimiento en un eje, con las mesas donde se montan los arreglos de paneles fotovoltaicos acoplados a un eje con un motor eléctrico. En las plantas de colección termosolar, particularmente aquellas que usan sistemas de concentración parabólica, se utiliza seguimiento para asegurar que la radiación llegue al foco del sistema por donde circula el fluido de alta capacidad térmica.

Hay múltiples tecnologías de seguimiento dependiendo de las necesidades de la instalación. Comúnmente se utiliza un elemento fotosensible para determinar el nivel de radiación sobre la superficie como un arreglo de fotorresistencias o fotodiodos. También es posible utilizar un panel fotovoltaico con un algoritmo simple de evaluar si cada movimiento aumenta o disminuye la producción de energía.

Las desventajas de los sistemas de seguimiento son que requieren más área entre superficies colectoras pues producen sombras mayores. Son un sistema de mejoramiento activo, es decir consumen energía, y requieren un sistema de control adicional. Si la zona tiene perfiles de viento fuerte se requiere un estudio más detallado de la estructura para prevenir daños.

Las ventajas son claras. Al modificar el ángulo de incidencia sobre la superficie se aumenta la energía solar que llega al sistema. Estas ganancias se traducen en un aumento de 50 a 100% de la radiación, con el incremento de eficiencia del sistema dependiendo de la tecnología solar particular.

### **2.5.2 Reflectores adicionales**

Otra tecnología que incrementa la radiación efectiva sobre la superficie objetivo es el uso de reflectores. Estos se pueden montar directamente a los lados de la superficie, fijos a un ángulo tal que reflejan la radiación incidente hacia la superficie efectiva. Otra alternativa es montarlos separados del sistema principal angulados de manera que reflejan sobre la zona activa. Esto se usa principalmente en instalaciones industriales, con las centrales termosolares usando concentración por reflexión que permite elevar considerablemente la radiación que incide, lo que aumenta la eficiencia como se menciona previamente.

Para sistemas fotovoltaicos funciona similarmente a un sistema de seguimiento. Si se montan a los costados de un sistema plano estático, aumentan la sombra proyectada por cada módulo. Si los paneles se montan uno junto al otro se pueden colocar reflectores en los costados libres, mejorando la función del arreglo completo. Usando espejos simples o superficies difusas con un buen índice de reflexión, por ejemplo con pintura blanca, se tienen aumentos de producción comparables al uso de un sistema de seguimiento de un eje, en torno al 20%.

En particular para sistemas rurales es una opción atractiva pues requiere un diseño más simple y cuyas fallas tienen mucho menor impacto. Si hay una falla en el sistema de seguimiento que deja el sistema apuntando hacia el oeste, la producción durante el día disminuye considerablemente. Con un sistema de reflexión los procesos de mantenimiento son considerablemente más simples. Se deben mantener limpias las superficies pero esto también se debiera hacer para los paneles fotovoltaicos y las consecuencias de no hacerlo no son graves.

Las desventajas al diseño son similares a un sistema de seguimiento, requiriendo mayor espacio entre las instalaciones debido al efecto sombra y presentando un peor perfil al viento que puede incrementar los torques externos y afectar la vida útil del sistema.

### **2.5.3 Lentes concentradores**

Un sistema de concentración alternativo utiliza lentes transparentes que permiten redirigir la radiación de un área mayor sobre la zona efectiva del sistema. Esto se puede usar para mejorar el funcionamiento de un sistema diseñado para radiación ambiente pero es más atractivo para sistemas diseñados para funcionar a niveles de radiación que no ocurren naturalmente. Esto permite diseñar por ejemplo celdas fotovoltaicas diseñadas para temperaturas considerables con buena eficiencia, a diferencia de las disponibles comercialmente que funcionan a potencia nominal para temperaturas ambientes de 25 °C.

La configuración de lentes más comunes son las llamadas Fresnel, que utilizan las propiedades de refracción prismática para aproximar el funcionamiento de un lente convencional como el utilizado en lupas comunes y corrientes.



Figura 11 Lente Fresnel (1) y convencional (2). Funcionamiento original Fresnel [23]

Esto permite producir lentes mucho más delgadas y livianos de materiales de bajo costo. Originalmente fueron diseñados para su uso en faros, permitiendo dirigir la luz producida por una lámpara en un haz de luz. Este mismo principio funciona a la inversa, tomando una radiación que incide de manera paralela y enfocándola en un punto.

Otro elemento a favor de los lentes Fresnel se debe a que las pérdidas por transmisión aumentan con el espesor lo que limita el tamaño de lentes convencionales. La aproximación mejora al aumentar la cantidad de cortes, con la mayor dificultad siendo la agudeza de las facetas prismáticas. Al no ser cortes ideales, existen imperfecciones que no concentran al foco.

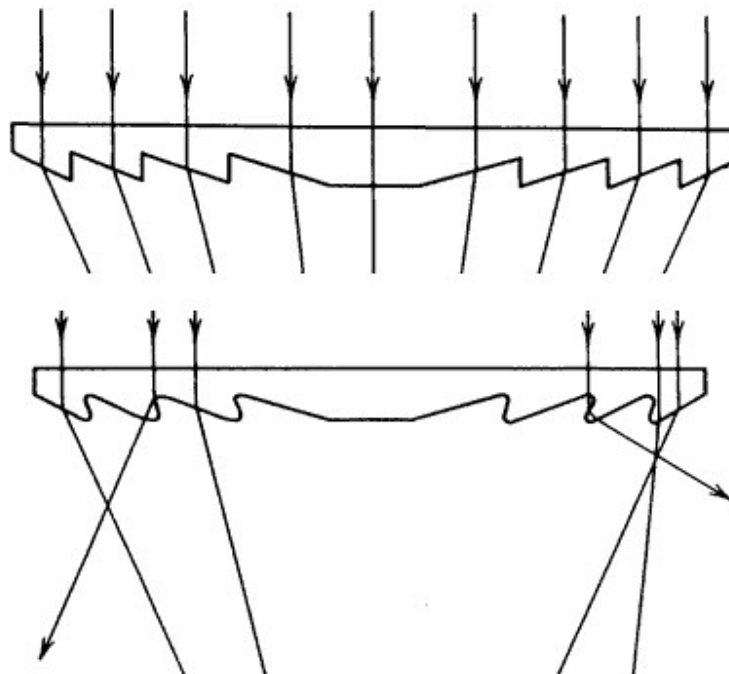


Figura 12 Lente Fresnel real [27]

Una limitación del método de concentración por refracción es que requiere seguimiento solar. Una pequeña variación en el ángulo de incidencia modifica la distancia focal por lo que se requiere radiación perpendicular al lente [27].

## 3. Desarrollo teórico y prototipo

### 3.1 Propuesta general

Se planea utilizar un sistema de concentración solar consistente de un lente Fresnel para alcanzar temperaturas elevadas que permitan aplicaciones de escala individual.

Al usar concentración se requiere implementar un sistema de seguimiento solar en dos ejes, manteniendo el lente perpendicular a la radiación incidente. Se reutilizan elementos de proyectos anteriores existentes en la facultad, modificando un concentrador parabólico y diseñando una nueva estructura.

El Fresnel requiere un cono de espacio vacío donde viaja la luz hacia el foco, lo que determina las dimensiones mínimas del prototipo. El sistema de seguimiento utiliza fotorresistencias ubicadas a los costados que permite determinar la dirección de movimiento requerido. Dos motores de corriente continua alimentados por baterías de 12 [V] permiten orientar el lente.

Se construye un contrapeso regulable usando planchas de metal para contrarrestar el torque del lente y permitir que los motores sean capaces de mover la estructura.

Durante las pruebas se planea medir la temperatura en el foco del lente sobre una placa metálica. Para evaluar el rendimiento del sistema se utiliza un piranómetro para determinar la radiación incidente.

### 3.2 Caracterización óptica

La radiación solar interactúa con objetos según tres componentes: la radiación absorbida, reflejada y transmitida. La magnitud de estas componentes depende de las características intrínsecas del cuerpo definidas como la reflexividad  $\rho$ , la absorbancia (o absorberancia)  $A$  y la transmitancia  $T$ . Estos valores son diferentes para cada longitud de onda de radiación y pueden depender de otras condiciones en las que se encuentra el material como son su temperatura o estado físico. Un ejemplo claro es la pérdida de reflexividad en espejos debido a desgaste del material o a la presencia de depósitos de material particulado.

El flujo energético en un concentrador depende entonces de propiedades del material y de la razón de concentración  $R_c$ , con el valor teórico siendo

$$I_f = T * I_d * R_c \quad (9)$$

Con  $I_f$  siendo la radiación incidente en el foco,  $T$  la transmitancia del lente e  $I_d$  la radiación directa en la ubicación del prototipo, medida con un piranómetro. Esta ecuación es diferente dependiendo de las características del sistema de concentración, con sistemas de reflexión reemplazando la transmitancia por la reflexividad.

La radiación directa se puede obtener teóricamente de la fecha del año y las coordenadas del lugar pero se deben considerar las pérdidas atmosféricas que requieren una estación meteorológica para determinar. Estas estaciones también miden los niveles de radiación, por lo que se pueden utilizar estos datos para la evaluación.

### 3.3 Características del concentrador

El elemento clave del sistema es un lente Fresnel que utiliza una serie de cortes en su superficie para aproximar un lente biconvexo, también conocido como lente lupa. Se realiza la compra de un lente circular en un marco cuadrado. Se procede a enmarcar en aluminio para fijar en la estructura de fierro que permite el seguimiento.



Figura 13 Lente Fresnel



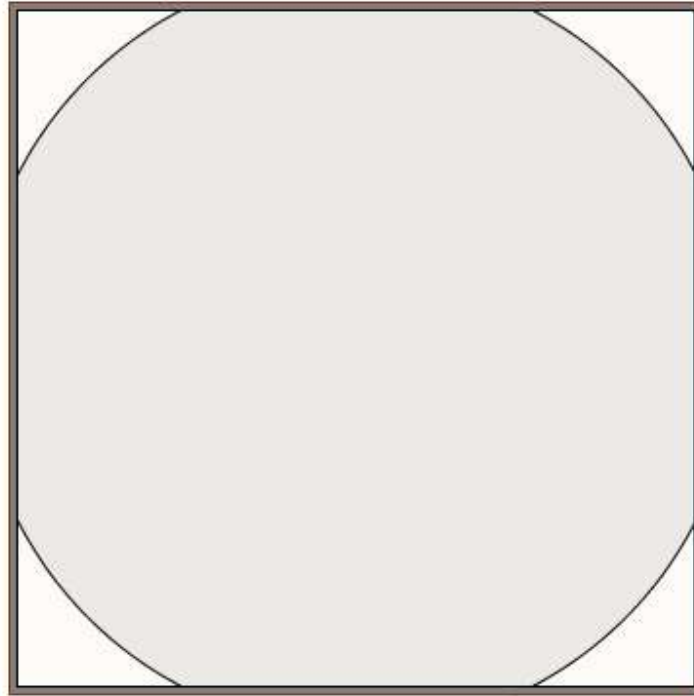


Figura 14 Lente Fresnel enmarcada

El diámetro del lente es de 110 [cm] aunque el marco cuadrado tiene un lado de 100 [cm]. Esto significa que mayor proporción del área cuadrada contribuye a la concentración comparado con un lente de diámetro 100 [cm].

El material consiste de PMMA (Polymethyl methacrylate) también conocido como acrílico o por el nombre Plexiglas. El lente tiene un espesor de 5 [mm] y una densidad de  $1,18 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$  lo que significa un peso de 5,9 [kg].

Las características ópticas del lente son un índice de refracción 1,491 para la longitud de referencia y 20°C de temperatura ambiente, transmitancia de 92% y una distancia focal de 130 [cm]. El radio focal, dato necesario para determinar las posibles aplicaciones, es de 5 [cm].

Si el lente fuera el círculo completo de 110 [cm] de diámetro entonces el área de absorción sería de 9500 [cm<sup>2</sup>]. Para obtener el área concentradora disponible, se debe aplicar trigonometría básica, comenzando con el ángulo sustentado por el arco que falta.

Debido al marco de aluminio que se muestra en la figura anterior, se pierde un centímetro de cada lado, lo que resulta en 98 [cm] de lado. Con esto y el diámetro se puede determinar las dimensiones del triángulo BCD en la figura, lo que permite determinar el ángulo.

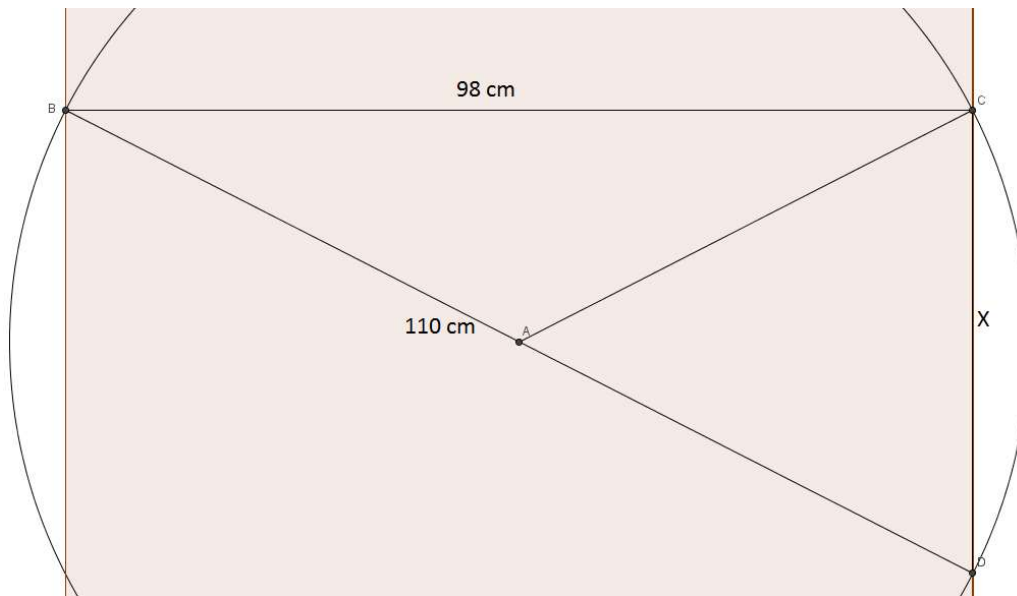


Figura 15 Segmento de círculo

Del teorema de Pitágoras se obtiene que el tercer lado es de 49,96 [cm]. Usando arco tangente para determinar el ángulo, se obtiene:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{\sqrt{110^2 - 98^2}}{98}\right) = 0.4714 \text{ [rad]} = 27,01^\circ$$

Utilizando propiedades de circunferencias, el ángulo que sustiene el segmento circular que sobresale del cuadrado es el doble, resultando en 0,9429 radianes.

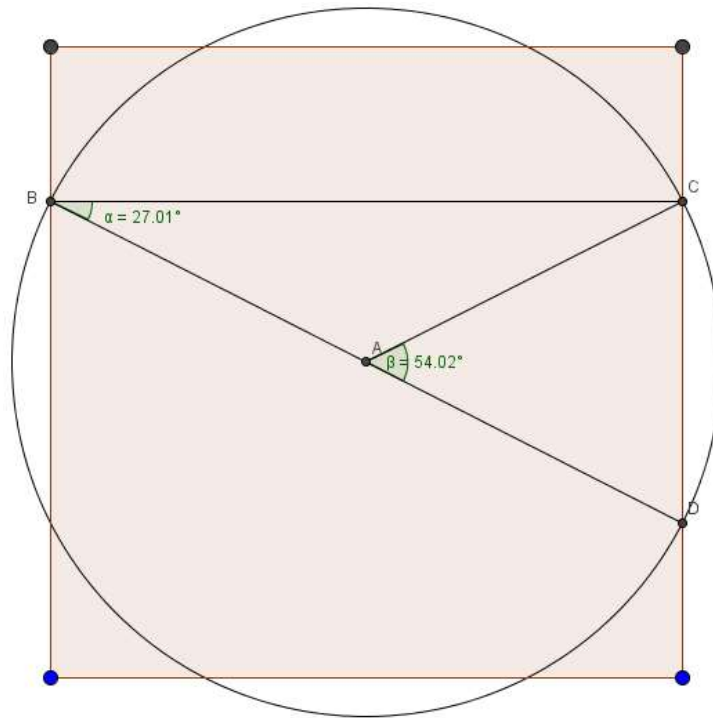


Figura 16 Ángulo sustendido

Para determinar el área externa al cuadrado, la fórmula es:

$$A = \frac{R^2}{2} * (\theta - \sin(\theta)) \quad (10)$$

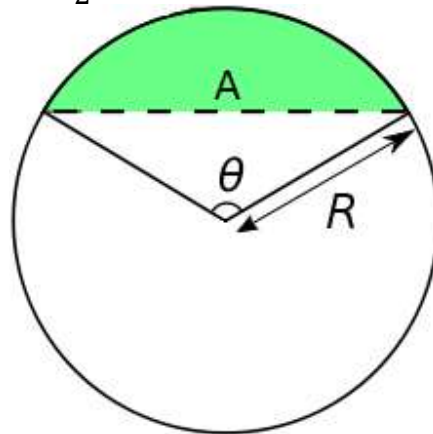


Figura 17 Área segmento circular [23]

Que resulta en un área de 202,127 [cm<sup>2</sup>]. Considerando que son cuatro segmentos circulares, el área efectiva final es 8694,8 [cm<sup>2</sup>].

Esto permite definir la razón de concentración  $R_c$  del sistema, correspondiente a la razón entre el área focal, correspondiente a 78,54 [cm<sup>2</sup>]. Con el área efectiva se obtiene:

$$R_c = \frac{A_i}{A_a} = \frac{8694,8 \text{ [cm}^2\text{]}}{78,54 \text{ [cm}^2\text{]}} = 110,7$$

Refiriéndose a la figura 3 en el capítulo anterior, esto determina un rango teórico entre 300 y 520 °C, con un límite máximo en torno a 730 °C.

### 3.4 Eficiencia térmica

La eficiencia en el receptor se define según la razón entre la energía incidente y la energía utilizable. Esto también se puede expresar en función de las pérdidas del sistema, resultando en:

$$\eta_T = 1 - \frac{P}{I_f * A_a} \quad (11)$$

Con P siendo las pérdidas totales en el receptor debido a conducción, convección y radiación y  $A_a$  el área de absorción. Al no tener un sistema para realizar trabajo, toda la energía se disipa como pérdidas, lo que permite alcanzar la máxima temperatura posible.

Las pérdidas dependen de las características del receptor, particularmente su área expuesta y emisividad, y de la temperatura alcanzada. Una vez finalizada la construcción del equipo se pueden realizar simulaciones con valores apropiados para determinar la temperatura de eficiencia cero donde las pérdidas son máximas y se llega a la temperatura de estancamiento térmico.

La energía radiada varía con la temperatura en el receptor a la cuarta potencia de la siguiente forma

$$P_{rad} = A * \epsilon * \sigma * (T_r + 273)^4 \quad (12)$$

Con A [ $m^2$ ] siendo el área del receptor a la temperatura  $T_r$  [°C] elevada. La temperatura se desplaza 273 para obtener su valor en Kelvin pues la constante de Boltzmann  $\sigma$  es  $5.67 * 10^{-8} \left[ \frac{W}{m^2 K^4} \right]$ . Finalmente  $\epsilon$  es la emisividad del receptor, un valor entre 0 y 1 que depende del material utilizado.

Las pérdidas por convección dependen también de la temperatura ambiente  $T_a$  [°C] y la velocidad del viento V [m/s]

$$P_c = A * (1.45 * (T_r - T_a)^{0.333} + 4.22 * V^{0.805}) * (T_r - T_a) \quad (13)$$

Para llegar a una temperatura mayor entonces es necesario disminuir las pérdidas. Las pérdidas por radiación se reducen al disminuir la superficie expuesta su emisividad. Las pérdidas por convección también dependen del área, además del viento que circula sobre el receptor. No se contempla un sistema para disminuir el viento, aunque si durante las pruebas del prototipo hay alta circulación se planea utilizar planchas de madera para proteger al receptor.

Revisando las fórmulas de las pérdidas es aparente que al incrementar la temperatura en el receptor, la energía radiada aumenta rápidamente en el rango de operación, siendo más de cuatro veces mayor a 500 °C que a 260 °C.

$$\frac{(500 + 273)^4}{(260 + 273)^4} = 4.424$$

### 3.5 Construcción de prototipo

Para ensamblar los elementos se comienza con una estructura utilizada por proyectos anteriores para un sistema de concentración basado en un plato parabólico reflector. El primer paso consiste en una evaluación de los elementos reutilizables. La base triangular de la estructura tiene el tamaño suficiente para la estructura de mayores dimensiones que requiere el lente concentrador. El sistema motriz de dos servos de 12 V con un sistema de cadena y catalina que permite un seguimiento horizontal-azimutal requiere pequeñas modificaciones pero es reutilizable.



Figura 18 Estructura preexistente

El eje que permite el seguimiento azimutal no puede reutilizarse debido a que a diferencia del concentrador parabólico que tiene su foco en frente del sistema, un lente concentrador requiere un cono de espacio disponible para que la radiación llegue al foco. Por esta misma razón toda la estructura de soporte del disco se elimina, requiriendo la construcción de otro elemento más apropiado al lente Fresnel que no interfiere con la concentración, disminuyendo al máximo la sombra sobre el foco.

El segundo paso es la modificación de los sistemas planeados para utilizar los elementos rescatables. Por ejemplo el seguimiento diseñado en torno a un Arduino para controlar los movimientos a partir de sensores funciona a 5 V por lo que se requiere implementar un puente H o controlador de motor para utilizar los servos

de 12 V. Esto también requiere modificar el código, lo que se explica en mayor detalle en una sección posterior.

El proceso de construcción de la nueva estructura se realiza en conjunto con un grupo de alumnos de segundo año cursando la asignatura de Taller de Proyecto: Energía Renovable y su Uso Eficiente [30].

La estructura de soporte del lente debe cumplir algunos requisitos básicos. Debido a la distancia focal y al radio del foco, se define un cono de luz que no puede ser interrumpido. Esto significa que según la distancia de cualquier elemento de la estructura al lente  $d$ , se puede calcular un radio mínimo de espacio vacío  $r$ .

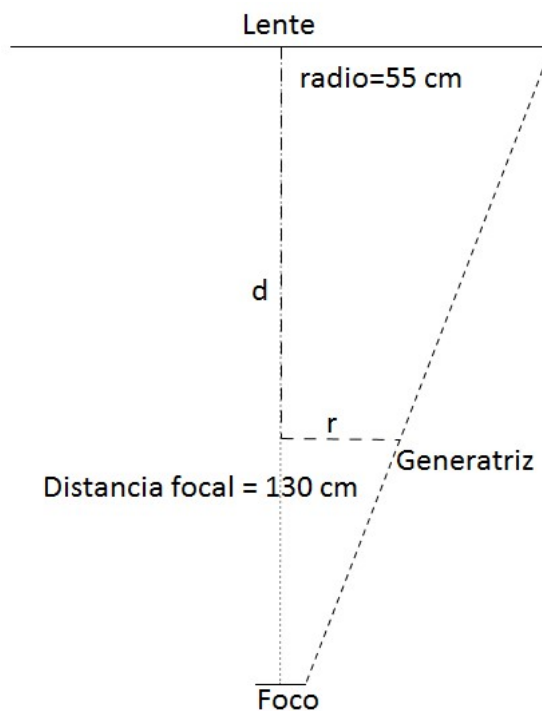


Figura 19 Corte de cono interno

Para lograr este requisito se plantea una estructura consistente en una pirámide truncada, con la base mayor correspondiendo al lente y la menor el foco. Para permitir el giro azimutal se remplaza el eje con un rectángulo formado de perfiles cuadrados de fierro. Al exterior de estos perfiles se fijan dos ejes alineados que permiten que el paralelepípedo actúe como un eje que permite el paso del cono de luz.

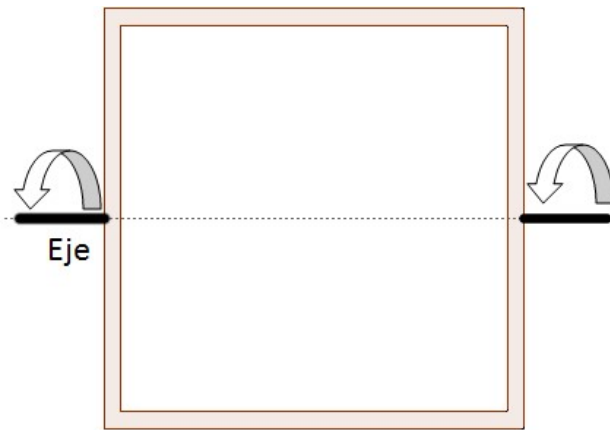


Figura 20 Eje cuadrado vacío

Debido al radio mínimo, los soportes verticales de la estructura previa se deben mover, separándolos lo suficiente para que se pueda fijar el eje cuadrado.



Figura 21 Base reducida



Figura 22 Construcción de eje cuadrado

Durante el proceso de construcción de la estructura piramidal se modifica el objetivo de la base menor debido a la dificultad de fijar la distancia focal exacta. El diseño final utiliza la base para fijar el contrapeso y el receptor.





Figura 23 Estructura pirámide truncada

Para fijar el lente a la estructura se utilizan dos barras que fijan la separación de los soportes. Cuatro placas metálicas rectangulares con ranuras se ubican en las esquinas, coincidiendo con agujeros en el marco de aluminio del lente. Esto permite utilizar pernos para suspender el lente y modificar la inclinación del plano respecto al plano del eje rectangular.



Figura 24 Barras y ranuras para fijar lente



Figura 25 Lente fijo en ranura

Finalmente es necesario determinar el contrapeso. El lente y su marco tienen un peso de 6 [kg] y se encuentran en torno a un metro del eje. Debido a la forma de la estructura, este peso es la componente principal que contrarrestar. Durante las pruebas preliminares se determina que se requieren 15 [kg] sujetos en el extremo opuesto, utilizando placas de hierro y prensas para sujetarlas a la estructura.



Figura 26 Contrapeso de prueba

Para la construcción del contrapeso se requiere la capacidad de regular tanto la posición y la masa por lo que se adapta el contrapeso de la estructura anterior, utilizando dos bloques de metal y dos pernos de 20 [cm] que fijan el peso a la estructura.

El material utilizado son planchas de acero de 10 [cm] de ancho y 5 [mm] de espesor. La barra de 6 metros es de 23,58 [kg] resultando en una densidad lineal de 39,3 [g/cm]. Debido a las dimensiones de los pernos y los perfiles de metal utilizados en la construcción de la estructura, se disponen de 16 [cm] de perno para fijar la masa de metal necesaria.

Se determina cortar trozos de 14 [cm] de las planchas de metal, con una masa de 550,2 [g]. Se fabrican 28 segmentos, alcanzando 15,4 [kg] con un espesor de 14 [cm]. Para fijar la masa a la estructura se perfora el metal con una broca de metal de 16 [mm] que permite utilizar los pernos heredados de proyectos anteriores.



Figura 27 Contrapeso diseñado

Durante el proceso de prueba del sistema de seguimiento se determina que se requiere alinear el centro de masa del contrapeso con el centro de masa del lente. De lo contrario no es posible calibrar el contrapeso para el movimiento completo de la estructura pues el ángulo de inclinación afecta de manera diferente a los centros de masa.

La configuración final del contrapeso no utiliza todos los segmentos de barra y ubica una segunda masa de 4 [kg] en el costado opuesto de la base inferior de la estructura.



Figura 28 Contrapeso funcional

La configuración final de masa final no permite un movimiento completo pero tiene un rango de operación de 80° de movimiento.

### 3.6 Sistema de seguimiento

El sistema implementado utiliza 4 elementos fotosensibles, en este caso fotorresistencias, para realizar seguimiento en dos ejes. Se compara el voltaje utilizando un Arduino, un microcontrolador con gran versatilidad y capacidad de programación.



Figura 29 Circuito básico fotosensible

El elemento básico es simplemente un divisor de voltaje entre una resistencia de valor fijo, en este caso de 10 K $\Omega$ , y una resistencia cuyo valor disminuye si aumenta la luz incidente. Esto resulta en una variación del voltaje de entrada al Arduino. Esta entrada es comparada con tres otras entradas correspondientes a los cuatro costados del lente para determinar en qué dirección mover el sistema.



Figura 30 Fotorresistencia fijado al costado del lente



Al circuito de control se agregan potenciómetros para regular la tolerancia de diferencia de voltaje y el tiempo entre comparaciones. Estos valores pueden ser fijados en el código y es posible que luego de las primeras pruebas del sistema se fijen en valores adecuados.

Para el control de los motores servo se utilizan las salidas digitales del Arduino, utilizando modulación PWM. Si se utilizaran servos de 5V alimentados directamente de la placa, se podrían utilizar las librerías de funciones de servos incluidas en el software de programación. Esto permite, por ejemplo, utilizar la función "posición" que permite asignar valores directos a ángulos de la estructura, lo que significa que la implementación de un sistema de seguimiento que utiliza la ecuación de tiempo es relativamente simple.

Lamentablemente, los motores servo utilizados son de 12 V, lo que significa que se requiere un circuito adicional para que la señal de control pueda mover la estructura. Esto se cumple con un controlador de motor, un circuito integrado llamado VNH2SP30, que actúa como un amplificador operacional, traduciendo la señal de entrada a otro nivel de voltaje y utilizando otra fuente de energía.

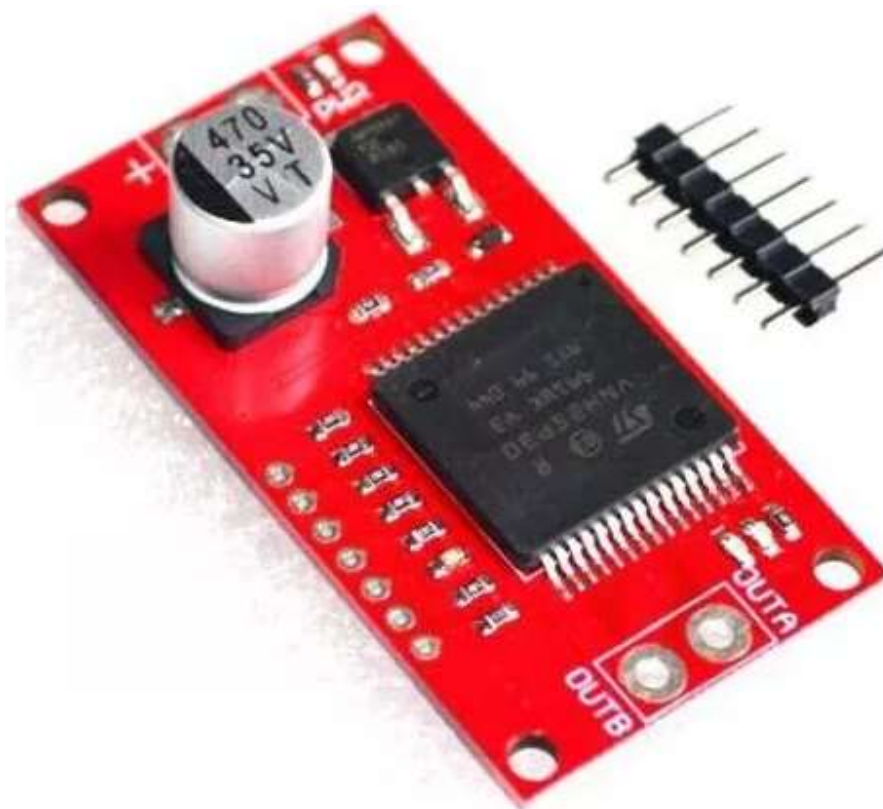


Figura 31 Puente H VNH2SP30 [25]

El uso de un controlador limita la complejidad de las señales de entrada, pues sólo permite señales de alto o bajo voltaje. Esto significa que el código del Arduino

ya no reconoce los motores como servos y se pierde la funcionalidad agregada por las funciones incluidas en la librería preprogramada.

El circuito que permite control bidireccional de un motor de corriente continua requiere de 4 entradas lógicas que determinan el modo de operación. El controlador también permite el uso de una señal analógica modulada PWM para regular la velocidad. Durante el funcionamiento utilizado, se utiliza una señal constante en la entrada analógica.

IN <sub>A</sub>	IN <sub>B</sub>	EN <sub>A</sub>	EN <sub>B</sub>	OUT <sub>A</sub>	OUT <sub>B</sub>	Modo de Operación
1	1	1	1	High	High	Freno rápido
1	0	1	1	High	Low	Giro ↻
0	1	1	1	Low	High	Giro ↻
0	0	1	1	Low	Low	Freno lento

Tabla 1 Tabla booleana de controlador

El circuito sugerido que permite que un microcontrolador funcionando a 5 [V] controle el funcionamiento de un motor de hasta 41 [V], con una capacidad máxima de 30 [A], se muestra a continuación.

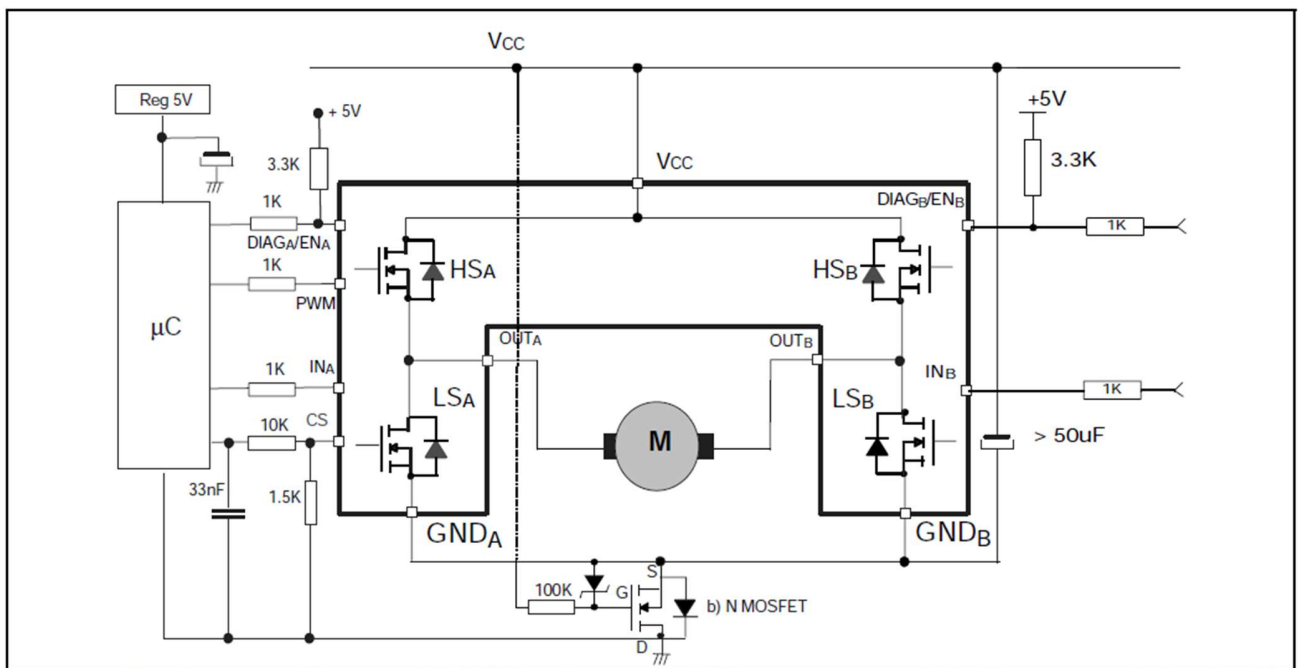


Figura 32 Circuito controlador de motor [28]

El uso del controlador a tensiones superiores de 16 [V] y corrientes mayores de 15 [A] requiere la instalación de disipadores de calor para prevenir la activación de protecciones frente a temperaturas extremas, diseñadas para proteger la placa frente a sobrecorrientes provocadas por cortocircuitos.

Originalmente se planeaba utilizar un controlador de motor llamado L298N con una capacidad de 2 [A] para controlar dos motores. Esta capacidad es insuficiente para los requerimientos del sistema. En el circuito final, el controlador se utiliza para transformar la tensión de 12 [V] de las baterías a los 5 [V] que alimentan el Arduino. Esto brinda mayor independencia al sistema, que ya no requiere una conexión USB permanente a un computador para activar el sistema de control.

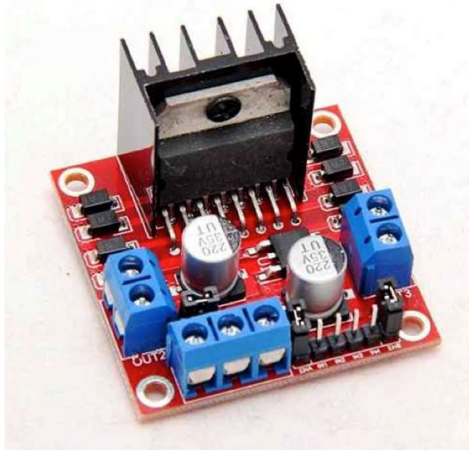


Figura 33 Puente H L298N [25]

Los motores utilizados tienen un par de torque nominal de 6 [kg-cm] y un torque máximo momentario de 18 [kg-cm]. Esto equivale a 0,588 [N-m] y 1,765 [N-m] respectivamente. Con una velocidad angular de 10 rpm de funcionamiento nominal, esto equivale a 36,94 [W] de potencia nominal y 110,8 [W] de potencia peak. A 12 [V] de funcionamiento, se requiere una corriente de 3,08 [A] nominales y 9,236 [A] en momentos de torque máximo.

El modo de funcionamiento usual del sistema de seguimiento son movimientos rápidos de corta duración. Debido a la masa de la estructura y la fricción presente en los ejes de rotación, se requiere torque considerablemente mayor al nominal para realizar los giros. Monitoreo de la corriente alimentada a los motores determina niveles entre 5 y 9 [A] dependiendo de la posición e inclinación de la estructura.



### 3.7 Algoritmo

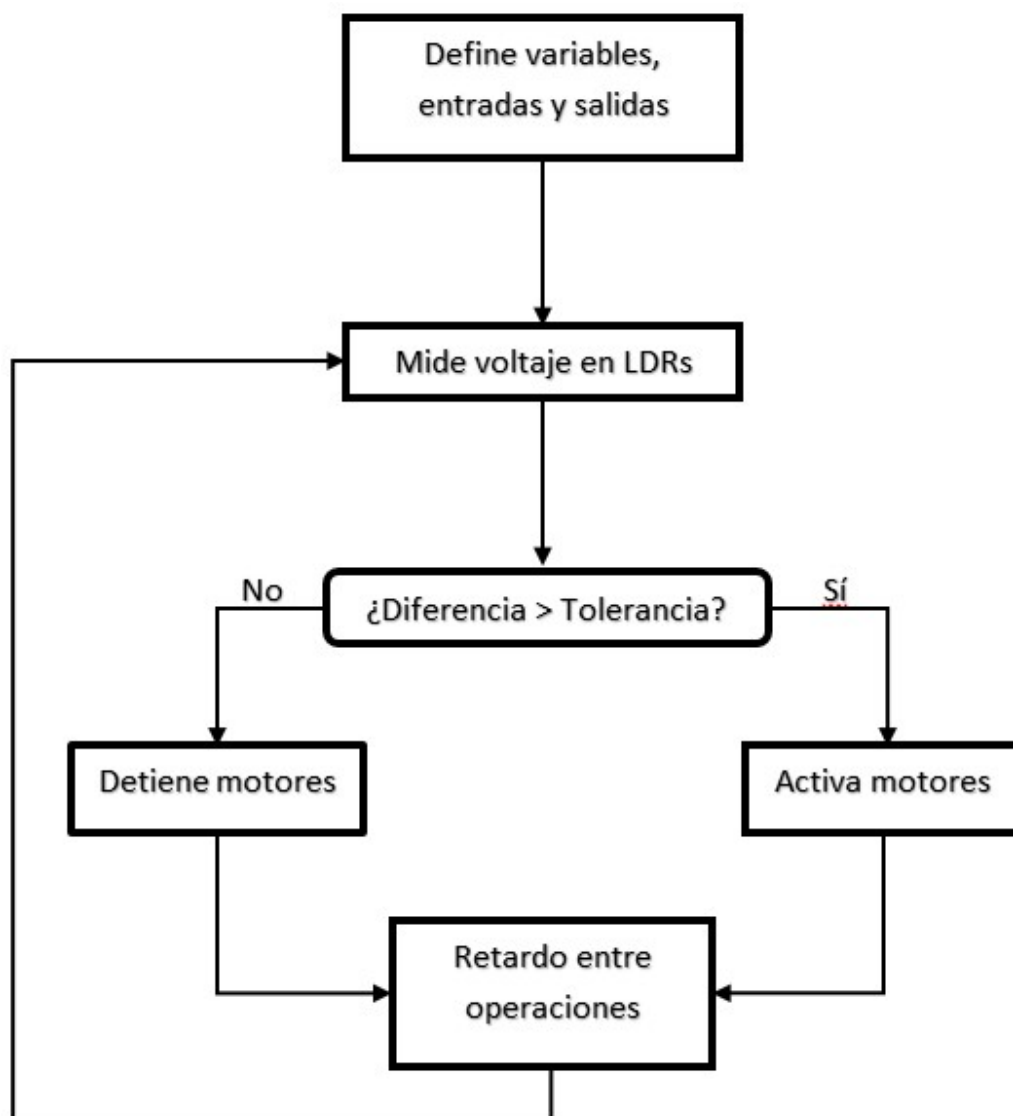


Figura 34 Diagrama de flujo de código

Los elementos fotosensibles se encuentran en los costados del lente, recibiendo sombra si no se encuentra apuntando directamente al sol. En la sombra, las fotorresistencias tienen una mayor caída de voltaje, lo que se detecta en el Arduino.

Valores en el código regulan el nivel de tolerancia antes que actúe el sistema de seguimiento y el intervalo de tiempo entre cada iteración del algoritmo. El intervalo se ingresa en milisegundos y la tolerancia con un valor entre 0 y 1023 que corresponde a un rango entre 0 y 5 [V].

Frente a una diferencia mayor a la tolerancia en el voltaje de las fotorresistencias, se determina cuál de los costados se encuentra en sombra y se ejecuta una función en el código que activa los motores, moviendo la estructura hacia el sol. La duración y velocidad del movimiento se definen en el código y no se modifican durante la operación.

### 3.8 Sistema receptor

Para evaluar la temperatura en las pruebas preliminares se utiliza una pistola de infrarrojo que permite determinar temperaturas hasta 650 °C con una precisión de  $\pm 1$  °C. La rapidez que brinda para realizar mediciones permite evaluar la temperatura en varios puntos de la placa lo que permite determinar si es necesario utilizar más de una termocupla para realizar un mapeo de temperatura.

La distancia entre el receptor y el lente determina el área de absorción, disminuyendo hasta la distancia focal. Debido al proceso de construcción de la estructura, está distancia no corresponde con la base inferior por lo que se procede a determinar la distancia óptima. Se utiliza una placa suspendida mediante alambre de cuatro prensas que permiten variar la distancia al lente para evaluar la temperatura alcanzada.

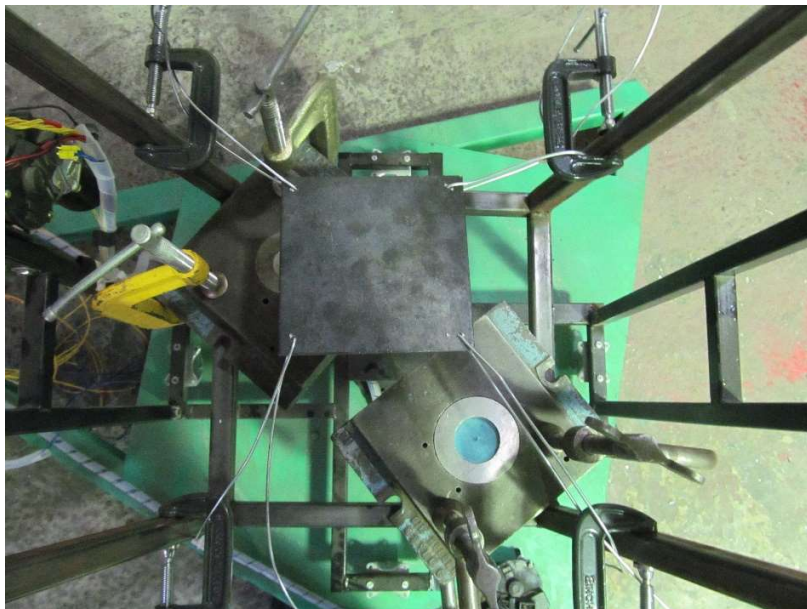


Figura 35 Placa receptora preliminar

Una vez determinada la distancia que resulta en temperaturas máximas, se fija utilizando los alambres de metal. Medidas de temperatura de la estructura

muestran que la pérdida térmica por conducción es un factor trivial, comparado a la componente de reflexión.



Figura 36 Placa receptora fija

## **4. Pruebas realizadas**

El 11 de agosto se realizaron pruebas preliminares del prototipo necesarias para el diseño final del elemento receptor y el sistema de seguimiento.

El 17 de diciembre se tomaron medidas de temperatura y radiación para evaluar las aplicaciones adecuadas al equipo.

### **4.1 Metodología y objetivos**

La prueba tenía como objetivo principal determinar el contrapeso necesario para contrarrestar el peso del lente. Este elemento es crítico para el funcionamiento de los servos del sistema de seguimiento, pues no tienen el torque necesario para mantener el sistema inmóvil cuando está correctamente orientado. Se determina utilizando placas metálicas de 6 [kg] fijadas a la estructura utilizando prensas de 1.5 [kg]. Finalmente con 15 [kg] de contrapeso la estructura se mantenía estática en posiciones de operación.

El segundo objetivo consiste en determinar la distancia entre el receptor y el lente, para lo que se utilizó una placa de fierro cuadrada de 13 [cm] de lado, perforada en cada esquina. Se suspendió en la estructura utilizando alambre metálico a prensas pequeñas que permiten variar la altura.

Por último un objetivo secundario era verificar que el cableado de los elementos fotosensibles no obstaculiza el movimiento del prototipo.

Cumplidos los objetivos se realizaron medidas de temperatura en la placa utilizando una pistola de infrarrojo con una temperatura máxima de 650 °C. Esto permite realizar una evaluación preliminar del equipo y determinar elementos de diseño del receptor, en particular el nivel de detalle necesario de las mediciones de temperatura, es decir cuántas termocuplas son necesarias y su ubicación en la placa.

La metodología de las medidas consistió en realizar seguimiento solar manual, ajustando la posición del equipo cada 5 minutos y realizando medidas de temperatura cada 10 minutos durante un periodo de dos horas.

La segunda prueba utilizó un piranómetro para evaluar la radiación incidente en el plano del lente al mismo tiempo que se registra la temperatura máxima en la placa. Se utilizó un contrapeso diseñado para la estructura que permite el movimiento automático accionado por el motor vertical.

## 4.2 Condiciones locales

La primera prueba se realizó en la plaza Ercilla, a pasos de la facultad.



Figura 37 Ubicación de prueba [26]

La radiación directa incidente en esta ubicación durante el mes de agosto llega a un máximo en torno a  $500 \text{ [W/m}^2\text{]}$  a una superficie horizontal, aumentando a  $615 \text{ [W/m}^2\text{]}$  cuando se utiliza seguimiento en dos ejes.

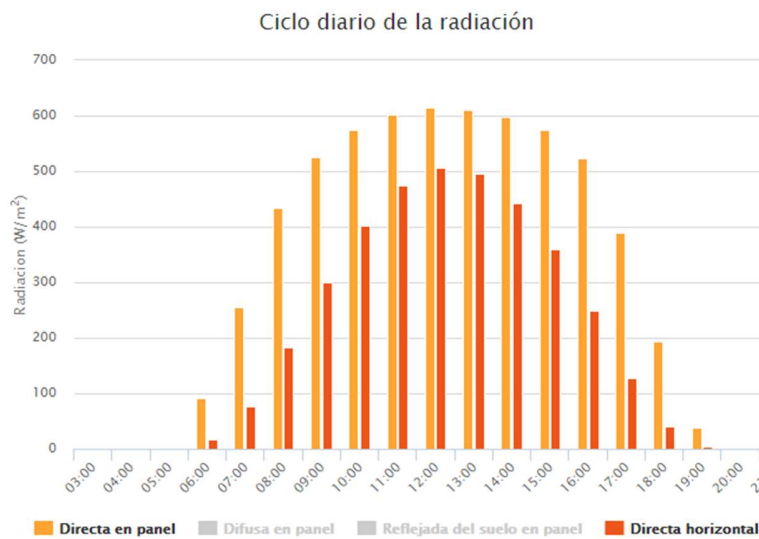


Figura 38 Radiación predicha explorador solar [20]

El plan original era utilizar valores medidos por la estación meteorológica del departamento de geofísica de la facultad, ubicado en su edificio a pasos del sitio de las pruebas. Lamentablemente sólo encuentran disponibles datos del año anterior, pero esto permite verificar la validez de los datos predichos [21].

Los niveles de radiación sobre una superficie horizontal medidos el 11 de agosto de 2015 se muestran a continuación:

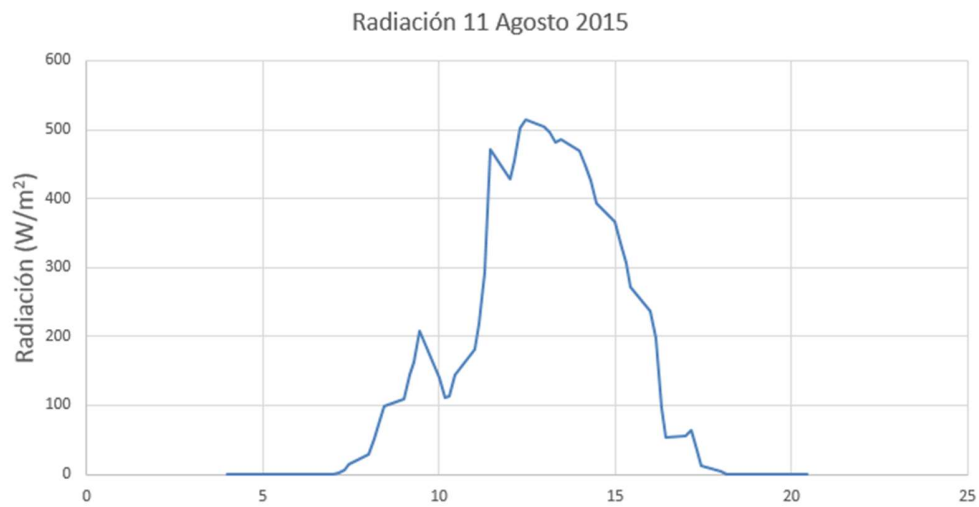


Figura 39 Datos históricos de radiación

Los niveles corresponden con los predichos por el explorador por lo que para el análisis de los resultados preliminares se utilizan los datos predichos. Durante las próximas pruebas se planea utilizar un piranómetro para medir directamente la radiación.



Figura 40 Prototipo vertical



Figura 41 Prototipo funcionando

La estructura se orientó manualmente cada 5 minutos, utilizando como guía la placa receptora, moviendo el lente de manera que el foco quede centrado.



La segunda prueba utilizó un piranómetro que se colocó sobre el lente al momento de realizar la medida de temperatura. Ocurrió dentro de la facultad, con un seguimiento manual idéntico a la prueba anterior.

### 4.3 Resultados

El primer resultado es la posición de la placa receptora. En un intento de aumentar la temperatura de operación se busca una posición de mayor concentración, lo que requiere una menor área focal. Se ubica en múltiples posiciones y se nota una forma particular. Debido a los sectores circulares que quedan fuera del marco cuadrado, se forman distorsiones al círculo en el foco.

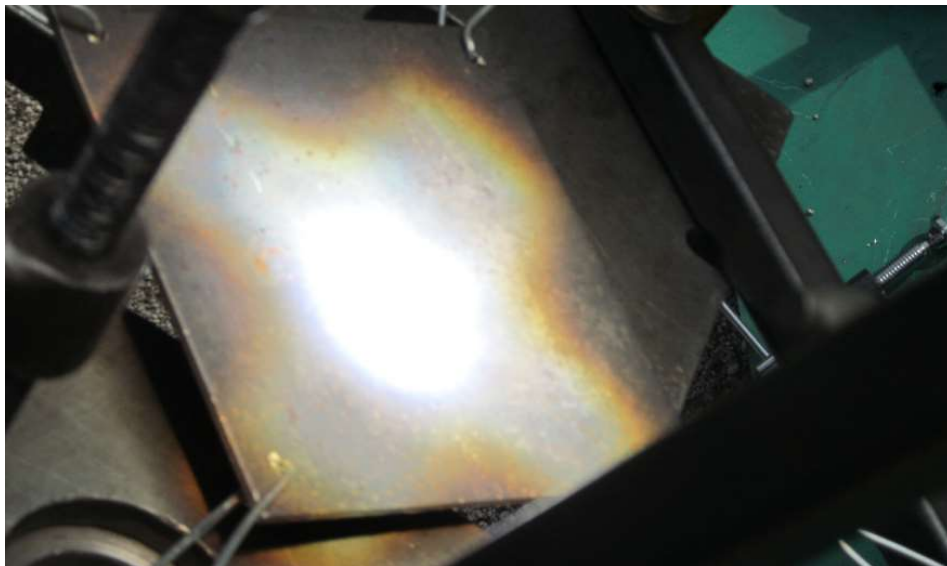


Figura 42 Forma focal irregular

Al no tener un área circular en el foco, los cálculos de  $R_c$  no son válidos. Se utilizan para evaluar la magnitud de la energía incidente y un rango de operación predicho de temperatura.

Las medidas de temperatura se realizaron con la pistola de infrarrojo detrás de la placa pues requiere un vector perpendicular a la superficie. Una evaluación rápida muestra que la temperatura de la placa varía significativamente entre el disco central y los extremos.

Hora	Temperatura [°C]
<b>13:15</b>	230
<b>13:40</b>	289
<b>13:50</b>	300
<b>14:00</b>	234
<b>14:10</b>	422
<b>14:20</b>	370
<b>14:30</b>	355
<b>14:43</b>	421
<b>14:54</b>	427
<b>13:15</b>	230

Tabla 2 Medidas de temperatura 2016-08-11

La primera medida de 230 °C fue a otra distancia más cercana al lente, donde el área focal es mayor. La medida máxima fue de 427 °C y momentos antes, apuntando la pistola en otro punto más alejado del centro el valor fue de 370 °C. El segundo punto bajo de 234 °C ocurre durante un periodo nublado del día.



Figura 43 Medidas de temperatura 2016-08-11

Otro resultado interesante fue la temperatura del resto de la estructura, en particular los alambres que mantienen la placa. Durante el funcionamiento los alambres se encuentran a 22 °C, la misma temperatura que el resto de la estructura, ligeramente superior a la temperatura ambiente. La temperatura de la estructura era independiente del funcionamiento, manteniéndose cuando se orienta el lente verticalmente.

La segunda prueba utilizó la posición de placa receptora determinada en la prueba anterior. Se midió la temperatura utilizando la pistola de infrarrojo y la radiación incidente sobre el lente. Para cada medida se busca la temperatura



máxima en la placa receptora. Durante este proceso se determina en general una diferencia de 150°C entre el punto de mayor temperatura y los lóbulos laterales en el foco. El resto de la placa que no recibe radiación se encuentra entre 350° y 450° por debajo de la temperatura máxima.

La temperatura ambiente durante las medidas fue de 29°C. La estructura se encuentra a 31° y el contrapeso, ubicado junto a la placa receptora, se encuentra a 35°C.

Hora	Temperatura [°C]	Radiación [W/m <sup>2</sup> ]
<b>12:45</b>	593	815
<b>12:59</b>	575	797
<b>13:07</b>	683	803
<b>13:14</b>	632	810
<b>13:29</b>	672	825
<b>13:37</b>	690	835
<b>13:42</b>	675	829

Tabla 3 Medidas de temperatura y radiación 2016-12-17

Debido a la fecha de la segunda prueba, la radiación incidente es significativamente mayor a la primera prueba, lo que tiene un efecto similar en la temperatura en la placa receptora.

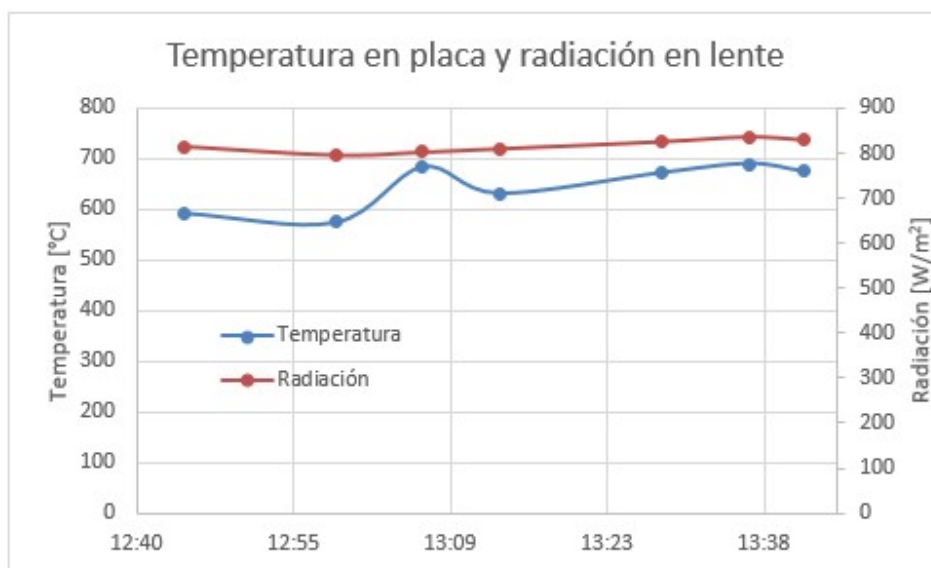


Figura 44 Medidas de temperatura y radiación 2016-12-17

Durante las primeras medidas realizadas en diciembre, corrientes de viento afectaron la temperatura de la placa. Se improvisó una barrera que redujo el efecto.



Figura 45 Barrera de viento

Debido a la ubicación de la prueba, el tiempo disponible para realizar medidas era limitado pero gracias al efecto de una sombra más definida se comprueba la causa de los lóbulos en el foco. Antes que todo el lente estuviera expuesto al sol, se aprecia la ausencia de uno de los segmentos, correspondiente al sector del lente en la sombra.



Figura 46 Foco irregular debido a sombra

## 4.4 Análisis

Con resultados de temperatura y datos adicionales del equipo se pueden realizar cálculos preliminares de las pérdidas. La placa receptora tiene un área de  $0,0167 \text{ [m}^2\text{]}$  y de datos históricos se determina que la velocidad de viento oscila entre  $0,5$  y  $1,2 \text{ [m/s]}$  por lo que se utiliza  $1 \text{ [m/s]}$  durante el cálculo.

Con una radiación incidente al lente de  $600 \text{ [W/m}^2\text{]}$  según el valor predicho y un área efectiva de concentración de  $0,87 \text{ [m}^2\text{]}$  resulta en una energía máxima de  $522 \text{ [W]}$ . La transmitividad de  $92\%$  del material según la hoja de datos del lente significa una energía incidente en el foco de  $480 \text{ [W]}$ .

En teoría esto debiera ser equivalente a la suma de las pérdidas calculadas a continuación, pero es claro del primer resultado que muestra una forma irregular en el foco en vez de un círculo que el cálculo asume distintas condiciones. Se incluye el análisis preliminar para determinar magnitudes de pérdidas y para establecer un procedimiento que se repetirá para pruebas futuras.

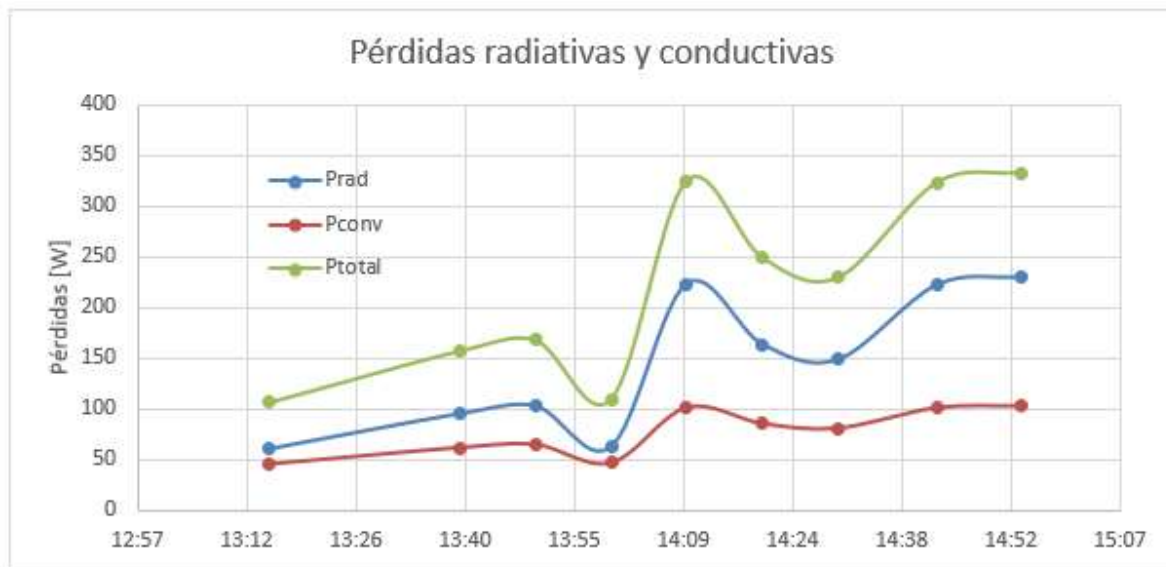


Figura 47 Pérdidas teóricas según medidas de temperatura

De la figura se observa que las pérdidas radiativas son la componente mayor de las pérdidas al aumentar la temperatura en el receptor. El valor de pérdidas máximas es de  $324 \text{ [W]}$ , inferior a los  $480 \text{ [W]}$  predichos. Esto significa que uno de los dos valores está incorrecto. Ya sea existe una componente adicional de las pérdidas, a pesar que la temperatura de la estructura no parece cambiar lo que sería evidencia en contra de pérdidas por conducción, o el cálculo de energía incidente es demasiado simple. Es posible que la diferencia se deba a la luz reflejada por la placa, evidente en las imágenes.

Sin tener valores de la radiación incidente al momento de las medidas de temperatura no es posible determinar que modificación del cálculo haría coincidir las pérdidas predichas con la energía incidente. Pero considerando que la radiación en la placa forma una X en vez de un círculo, es evidente que no toda la energía cae en el punto de temperatura máxima.

Con los valores utilizados de área y velocidad de viento se pueden realizar predicciones de temperaturas máximas, o al menos de cotas superiores a la temperatura en caso que existan componentes adicionales de pérdidas no consideradas. Para pérdidas totales de 480 [W] la temperatura máxima resulta de 505 [°C].

Si se plantea una radiación incidente mayor de 1000 [W/m<sup>2</sup>] al lente, correspondiente a un día de verano o una latitud norteña, resulta un total de 800 [W] disipados lo que corresponde a una temperatura de 630 [°C]. Incluso en caso que se pudiera alcanzar el nivel de radiación fuera de la atmósfera de 1381 [W/m<sup>2</sup>], las pérdidas serían de 1100 [W], resultando en un límite de temperatura de 712 [°C].

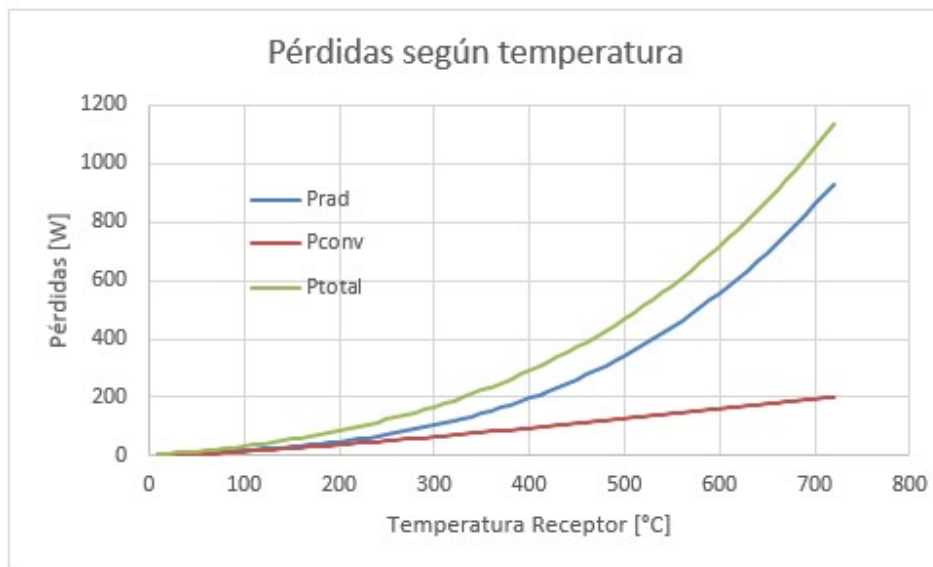


Figura 48 Pérdidas vs Temperatura

El gráfico muestra que el límite principal a temperaturas más altas son las pérdidas radiativas que se reducen principalmente reduciendo la emisividad del cuerpo receptor, aproximándose en lo posible a un cuerpo negro. Las pérdidas por convección se pueden reducir utilizando material aislante, aumentando en menor medida la temperatura máxima.

Los valores de radiación incidente permiten realizar un análisis más detallado. Evaluando el área focal irregular se distinguen 3 áreas distintivas. El círculo central tiene un radio aproximado de 2,8 [cm] y se encuentra a la temperatura máxima. Para los cálculos de pérdidas se utiliza el valor medido. Los lóbulos irregulares se aproximan por cuadrados de 1,6 [cm] de lado y se consideran temperaturas 150° menores a los valores medidos. Por último se considera el resto de la placa, un cuadrado de 13 [cm] de lado, con una temperatura inferior a la medida por 450°.

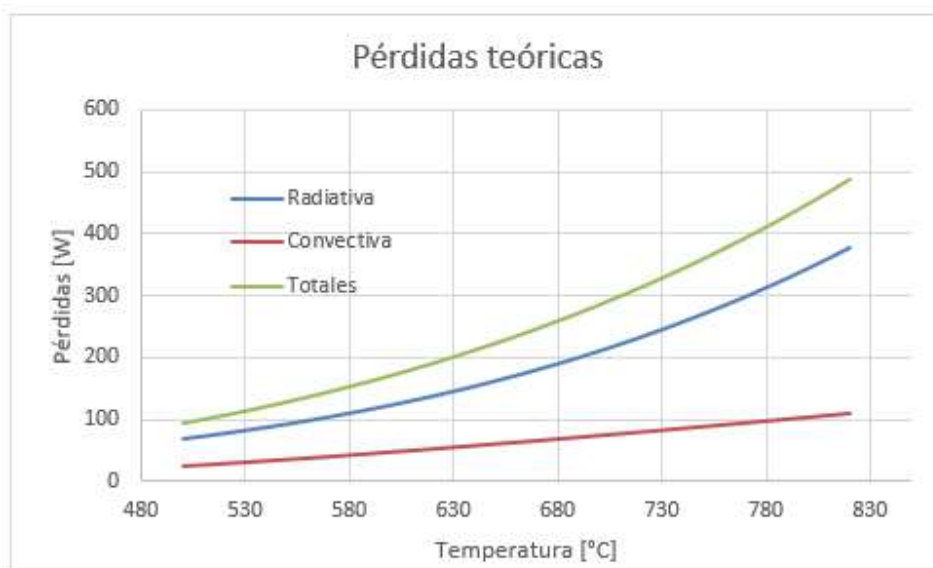
Para evaluar las pérdidas convectivas se considera viento de 1 [m/s] y la temperatura ambiente de 29°C.



Figura 49 Pérdidas teóricas calculadas con foco irregular

Comparando las figuras de pérdidas teóricas se aprecia que el cálculo aproximado usando el área irregular resulta en pérdidas similares a los valores usando la predicción de un foco regular de temperatura homogénea a pesar que las temperaturas medidas en el segundo caso son más de 200° superiores.

Utilizando las nuevas fórmulas de pérdidas, con tres áreas a diferentes temperaturas, se predicen las pérdidas en un rango de temperaturas. Las diferencias entre cada sección dependen de la temperatura máxima por lo que sólo son válidas en torno a los valores de temperatura medidos.



Usando las fórmulas más simples, se predicen pérdidas de 1000 [W] a 700 °C. Considerando el área irregular en el foco y diferencias de temperatura, a 690 °C se predicen 271 [W] de pérdidas térmicas. Una razón para realizar este cálculo son los valores de radiación incidente que permiten, junto a las características ópticas del lente, determinar la potencia real concentrada por el lente. Considerando la razón de concentración de 110 y que incide sobre las áreas del círculo central y los lóbulos, se obtiene entre 284 y 294 [W] en el foco, similar a los valores predichos de pérdidas teóricas. Pero al modificar el área focal también se modifica la razón de concentración.

El cálculo de áreas irregulares resulta en 0,0035 [m<sup>2</sup>] de foco recibiendo radiación con la misma área del lente de 0,87 [m<sup>2</sup>], obteniendo una razón de concentración geométrica de 246,9. Este valor resulta en un rango de temperatura de operación predicho de 340 a 570 °C. El prototipo no utiliza la energía, aumentando su temperatura hasta que las pérdidas térmicas igualan la potencia de entrada. El valor máximo de temperatura teórico es de 755 °C.

Para evaluar la potencia que incide en el foco se utiliza el producto de la radiación medida por el piranómetro y el área del lente. Esto resulta en potencias en torno a 650 [W], considerablemente mayores a los valores de pérdidas predichas. Incluso si las temperaturas de las otras áreas en el foco son 100° mayores, las pérdidas máximas sólo serían 70 [W] mayores a los 271 [W] determinados.

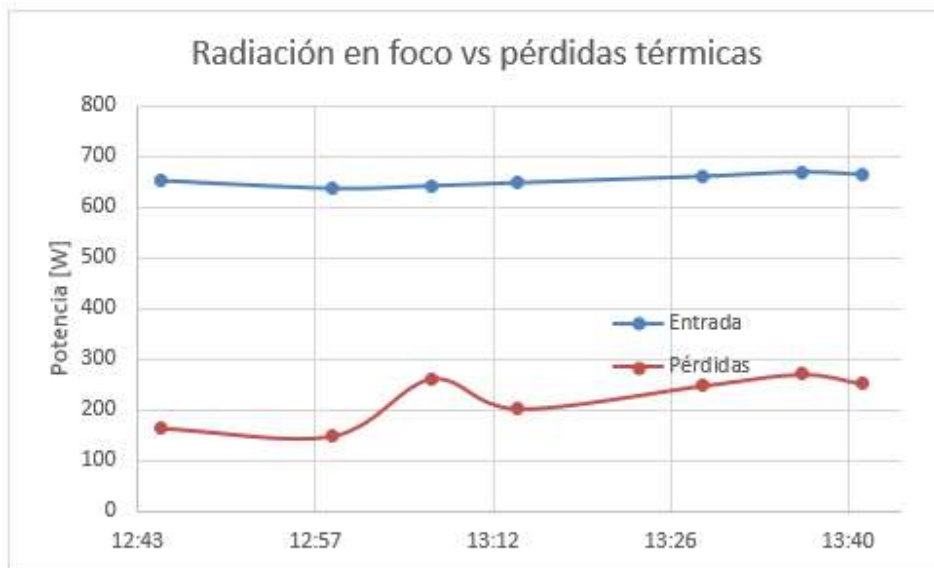


Figura 50 Potencia en foco vs pérdidas térmicas

Realizando mediciones de radiación, las pérdidas térmicas son un porcentaje considerablemente menor que los calculados para la primera prueba. Considerando las componentes de radiación y convección, el promedio es 33% de la potencia de entrada en pérdidas. El valor máximo es de 40,7%. Un sistema de seguimiento más constante que el manual mantendría el círculo de temperatura máxima sobre el mismo punto de la placa, permitiendo temperaturas mayores con la misma radiación incidente en el lente.

A pesar de las dificultades ocasionadas por movimientos irregulares, está claro que hay componentes no consideradas. La temperatura de la estructura, dentro de 5° de la temperatura ambiente, muestra que las pérdidas por conducción no son un factor. De las imágenes se aprecia un efecto considerable de reflexión, al punto que durante las mediciones se requieren lentes oscuros que permiten mirar directamente la placa receptora, necesario para realizar seguimiento manual o monitorear el funcionamiento del sistema automático.

Para obtener resultados térmicos más confiables y de mayor resolución sobre toda la superficie receptora, se requiere de una cámara de infrarrojo, capaz de medir temperatura continuamente. Esto permitiría determinar las pérdidas térmicas reales y el porcentaje real de potencia disipada. Un monitoreo constante de la temperatura requiere el funcionamiento permanente de un piranómetro sobre el lente, lo que significa modificar la estructura, agregar un sistema de almacenamiento de datos y volver a calibrar el contrapeso.

Las pruebas preliminares resultaron en la decisión de no aislar la placa receptora para eliminar las pérdidas conductivas. Para reducir la reflexión se

necesita cambiar el material de la placa receptora o cubrir el metal con pintura anti-reflectante. Esto aumenta el costo pues se requiere un rango de operación de temperatura considerablemente mayor al disponible en el mercado.

La tecnología existe, particularmente en otros sistemas de concentración como colectores solares para calefacción de agua o directamente en los concentradores parabólicos de funcionamiento similar al prototipo. Modificar el sistema receptor para obtener temperaturas mayores no es práctico para la mayoría de las aplicaciones individuales que requieren elementos específicos en el foco. Esto se detalla en la sección a continuación.



## 5. Aplicaciones

Con los resultados y análisis realizados en el capítulo anterior se pueden postular numerosas aplicaciones del sistema de concentración, considerando la temperatura alcanzada y las modificaciones necesarias para llevar el sistema de un prototipo a un equipo funcional.

Durante el proceso de investigación inicial se revisan múltiples tecnologías solares, desde las convencionales como celdas fotovoltaicas a aplicaciones innovadoras como es la impresora solar 3D. Este proyecto, realizado por Markus Kayser durante su programa de magister de Product Design en la RCA, resultó en el enfoque de la memoria en torno a un sistema de concentración Fresnel.

### 5.1 Impresora solar 3D

La compra del lente originalmente estaba orientada al eventual desarrollo de una impresora solar dentro de la facultad.

#### 5.1.1 Diferencias con "Solar Sinter"

El proyecto de Markus Kayser, denominado "Solar Sinter", es considerablemente más avanzado que el prototipo realizado para esta memoria.

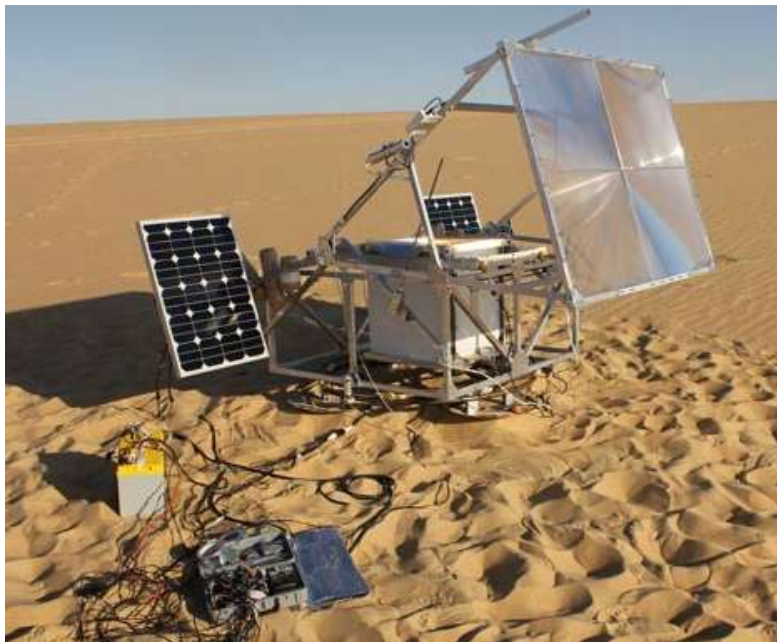


Figura 51 Solar Sinter [19]

El Solar Sinter tiene un lente Fresnel de 1.4 [m<sup>2</sup>] que dirige la radiación a una plataforma móvil llena de arena. El foco se mueve sobre la superficie según el patrón del elemento a imprimir.

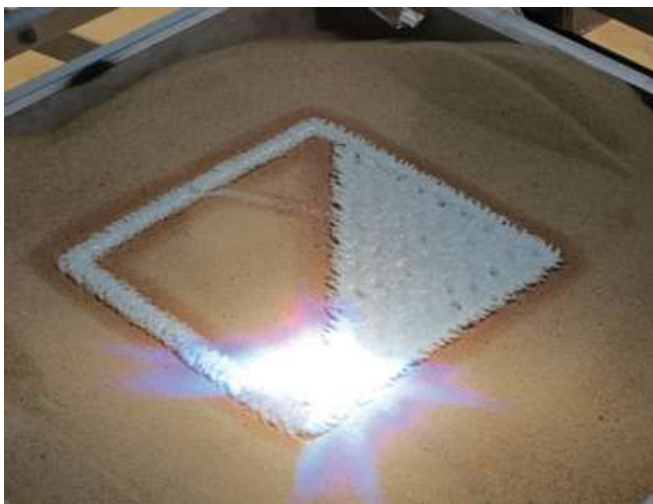


Figura 52 Proceso de impresión

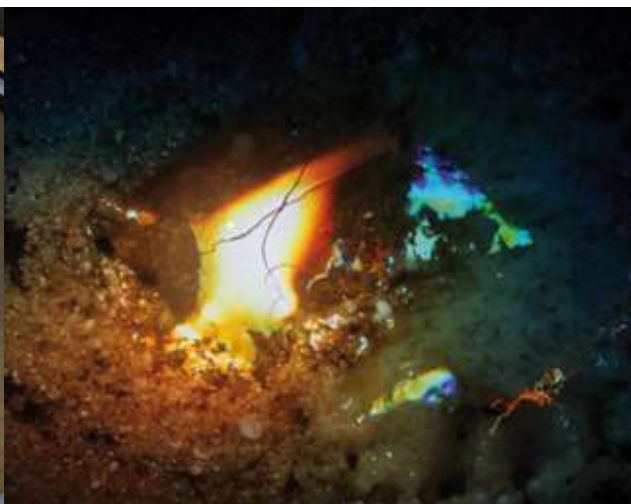


Figura 53 Vista cercana de foco [19]

La estructura utiliza dos paneles fotovoltaicos y botellas plásticas llenas de arena como contrapeso. Los paneles alimentan los motores que permiten el seguimiento solar y la electrónica necesaria para realizar la impresión.

En el foco se alcanzan temperaturas entre 1400 y 1600 °F, es decir entre 760 y 870 °C. Las diferencias entre este resultado y lo alcanzado por el prototipo se deben principalmente a la razón de concentración mayor del Solar Sinter. Tiene 57.5% más área de intercepción, con un área focal igual o menor que el Fresnel utilizado.



Figura 54 Cuenco impreso por Solar Sinter [19]

### **5.1.2 Implementar una impresora solar**

Para utilizar el prototipo en un proceso de impresión solar 3D se deben realizar varias modificaciones. Lo más importante es aumentar la razón de concentración, ya sea con otro lente Fresnel de mayor tamaño o área focal significativamente menor.

Utilizando el mismo lente también es posible aumentar la concentración con otro elemento óptico. Una lente bicóncava redirige los rayos concentrados por el Fresnel, emitiéndolos paralelos hacia otra lente biconvexa con un área focal menor, resultando en la radiación captada por el Fresnel concentrada en un foco más pequeño.

Con estas modificaciones se logra la temperatura superior necesaria para fundir la arena utilizada como material de impresión. La estructura se debe rediseñar para permitir que el foco se mantenga constante sobre una superficie, lo que requiere mover el eje que permite seguimiento vertical, aumentando el torque ejercido por el lente. Esto significa servos considerablemente más poderosos y contrapesos más significativos.

Finalmente queda el trabajo de la construcción de la impresora misma. Se requiere movilidad en tres ejes y electrónica de control que permite traducir patrones diseñados en software CAD al movimiento que resulta en objetos impresos. Esto requiere un funcionamiento inverso a la mayoría de las impresoras actualmente disponibles en el mercado que mueven el extrusor de material sobre una plataforma inmóvil.

## **5.2 Pirquinería**

El minero artesanal, que trabaja sólo o en grupos pequeños, se llama pirquinero. Su estilo de vida requiere alta movilidad, adentrándose en las montañas en búsqueda de vetas que pueden ser trabajadas con técnicas de pequeña escala. Usualmente esto significa tecnología anticuada, similar a los procesos de minería industrial del siglo XIX, usando explosivos para obtener rocas con contenido apreciable del metal deseado.

El proceso de extracción de oro, cuya importancia aumenta cada año que el precio de cobre continúa inferior a sus niveles históricos, luego tritura las rocas en un molino con agua, formando un lodo con niveles elevados de oro.

A esta molienda se agrega mercurio que forma una amalgama con el metal áureo. La pasta de barro y amalgama se escurre por una serie de bandejas donde las rocas y agua se eliminan, dejando la masa de mercurio y oro. La amalgama se estruja para extraer el mercurio líquido, dejando un esferoide sólido de metal.



Figura 55 Amalgama sólida de mercurio y oro [22]

Esta amalgama se fija en una plataforma metálica que luego se pone al fuego, ya sea en una fogata, en un horno improvisado o con un soplete. Esto evapora el mercurio, dejando pepas de oro.



Figura 56 Evaporación de mercurio [22]



Figura 57 Pepas de oro 3-4 cm diámetro [22]

La aplicación directa de un sistema de concentración sería elevando la temperatura de la amalgama para evaporar el mercurio. Esto requiere el diseño de un receptor que permite alcanzar la máxima temperatura y da la oportunidad de implementar tecnologías desarrolladas para disminuir el impacto sobre el medio ambiente y la salud de los pirquineros. Es posible instalar un sistema de condensación que captura el vapor de mercurio y permite que los pirquineros reutilicen el mercurio líquido, reduciendo sus costos y el efecto tóxico del metal en estado gaseoso.

### **5.3 Hornos y cocinas solares**

Una aplicación directa de escala individual común son dispositivos de cocción. La técnica usual es concentración por reflexión, con los productos más elaborados reduciendo las pérdidas térmicas para alcanzar temperaturas superiores. No suelen usar sistemas de seguimiento.

Existen en un amplio rango de precios dependiendo del material utilizado. Su bajo costo promueve diseños abiertos para construcción casera, aunque existen compañías que venden modelos más elaborados.

Las construcciones caseras suelen alcanzar temperaturas entre 80 y 100 [°C] sólo utilizando reflexión. Al introducir elementos que reducen las pérdidas es posible alcanzar 150 a 200 [°C], que suele ser el rango de operación de los productos profesionales.

El uso de concentración permite alcanzar temperaturas de operación considerablemente mayores. La tecnología usual son concentradores parabólicos que permiten alcanzar temperaturas de 400 [°C] que compiten directamente con hornos más tradicionales. Estas cocinas solares usan seguimiento manual, montando el reflector en un marco que permite movimiento en ambos ejes. Algunos modelos utilizados para cocina industrial realizan un movimiento automático de 15 grados por hora para compensar la rotación de la tierra y modificando el ángulo vertical según la época del año.

El uso de una lente Fresnel de escala individual se asemeja a un concentrador parabólico. Con la razón de concentración del prototipo se obtiene una temperatura de operación en un rango de 340 a 570 [°C], dependiendo de la radiación incidente y el uso de elementos que reducen las pérdidas. Este resultado era esperado pues durante la compra del lente, este Fresnel era considerado para uso de cocina solar, incluyendo imágenes de hornos construidos con el producto en la página web.





Figura 58 Imagen promocional vendedor Fresnel

Comparando el prototipo se considera una cocina solar industrial que usa el sistema de seguimiento automático burdo en un eje a velocidad constante. El modelo considerado es una cocina Scheffler de 16 [m<sup>2</sup>] que concentra 3 [kW]. No es un paraboloide perfecto, si no que se aproxima por placas rectangulares de espejos montadas en un marco de plástico flexible. Esto resulta en un rendimiento de 187,5 [W/m<sup>2</sup>].

De las pruebas realizadas con el prototipo, con un área de 0,87 [m<sup>2</sup>] se concentran 650 [W]. El rendimiento de la estructura construida es de 747 [W/m<sup>2</sup>] casi 4 veces mayor a la cocina Scheffler. Comparando precios con hornos y cocinas solares, los productos tipo caja se venden entre 180 y 240 mil pesos chilenos. Los sistemas parabólicos, más apropiados para comparar con el prototipo, de diámetro de reflector de 100 [cm] y una potencia de 500 [W], tienen un precio entre 205 y 240 mil pesos chilenos.

El lente Fresnel se compró por 250 mil pesos chilenos pero requiere la construcción de un marco metálico. Las cocinas solares usualmente no utilizan seguimiento automático, por lo que el costo de construir un marco que permite

orientar manualmente el lente no incrementa significativamente el costo pero si requiere trabajo considerable comparado a montar un producto comercial.

En definitiva el Fresnel tiene excelente potencial como elemento clave para cocinas solares de escala individual pero requiere más recursos y conocimiento que las alternativas. Y en caso de agregar un sistema de seguimiento automático el rendimiento aumenta significativamente pero la complejidad incrementa dramáticamente.

## **5.4 Conclusión**

El uso de lentes Fresnel para realizar concentración solar logra obtener niveles de radiación órdenes de magnitud superiores a los naturales. Esto permite utilizar tecnologías innovadoras como celdas fotovoltaicas de alto rendimiento o realizar impresión tridimensional en material abundante como es la arena en un desierto.

Se construye un prototipo de concentrador, fijando un lente Fresnel que durante el mes de agosto alcanza temperatura de 420 [°C] y 690 [°C] en diciembre.

La estructura construida es de acero, en una forma de pirámide truncada invertida. Se utilizan dos ejes de movimiento para realizar un seguimiento solar completo. Dos servos mueven sistemas de cadena y catalina para aplicar mayor torque.

El sistema de seguimiento utiliza fotorresistencias monitoreadas por un elemento Arduino que controla los servos para orientar el lente perpendicular a la radiación solar directa.

En el foco se ubica una placa metálica. Midiendo las temperaturas alcanzadas se calculan los valores de pérdidas, dominando la componente radiativa. Posterior análisis de la energía disipada muestra una cota superior a la temperatura alcanzable por el sistema.

Las medidas de temperatura no utilizan el sistema de seguimiento automático pues el sistema de movimiento horizontal presenta múltiples problemas. La estructura preexistente que se utilizó como base para el prototipo utiliza un sistema de cadena y catalina para conectar la rotación del eje de motores de corriente continua con el giro de la estructura. Esto funciona perfectamente con el movimiento azimutal, requiriendo sólo un contrapeso calibrado al lente. Lamentablemente el sistema de cadena y engranajes no es apto para utilizar

paralelo al suelo, pues la gravedad significa mayor dificultad en determinar la tensión precisa de cadena que permita girar la estructura sin oponer tanta resistencia al movimiento que el motor no es capaz de realizar el giro. La posición del motor y engranaje significa que trabajar sobre el sistema es de alta complejidad y riesgo pues requiere suspender la estructura metálica en altura para acceder a los elementos.

El último problema del sistema de movimiento horizontal significa que el uso del seguimiento automático en las pruebas al exterior pasa de ser difícil a imposible es la fragilidad del punto de operación. Al disminuir la tensión lo suficiente para mover la estructura, la cadena queda suficientemente suelta que transportar el prototipo provoca su caída. Debido a las dificultades de encontrar la tensión adecuada no es factible realizarlo en el punto donde se realizan las medidas por lo que se toman valores de temperatura utilizando seguimiento manual.

Implementar de manera efectiva el seguimiento automático requiere un rediseño del movimiento horizontal, utilizando diferentes principios al azimutal.

Durante la segunda ronda de pruebas se utiliza un piranómetro para medir la radiación incidente en el lente. Conociendo las características ópticas del prototipo esto permite determinar la potencia efectiva en el foco y compararlo a las pérdidas térmicas teóricas.

La potencia disipada llega a un máximo de 40% de la potencia incidente, siendo usualmente en torno a un 33%. Para realizar un cálculo más detallado capaz de evaluar mejor las pérdidas, se requieren medidas de la temperatura sobre toda la superficie de la placa receptora. Esto es posible con una cámara infrarroja que también permitiría observar el efecto del movimiento provocado por el seguimiento sobre la temperatura alcanzada.

La diferencia entre la radiación concentrada por el lente y la disipada por las pérdidas térmicas se debe a componentes no calculados, con la más probable siendo la reflexión de la luz. Es evidente de las imágenes tomadas del prototipo en funcionamiento que gran parte de la radiación no es convertida en calor, suficiente para que sea recomendable utilizar lentes oscuros y no mirar directamente el foco.

Reducir la reflexión es más complejo que disminuir las pérdidas por convección o conducción y no son factibles en muchas de las aplicaciones. Por ejemplo en la impresora 3D el foco utiliza arena que también refleja un porcentaje importante de la luz incidente como se aprecia en las imágenes del Solar Sinter en funcionamiento.

Respecto a las aplicaciones evaluadas, se llegan a conclusiones interesantes. La minería artesanal tiene puntos donde se requieren altas temperaturas en zonas



pequeñas y usualmente esto ocurre en zonas de alta radiación solar. Sin embargo hay alternativas más baratas y la metodología que se utiliza tiene un efecto negativo sobre el medioambiente y las personas que lo utilizan. A futuro sería mejor que se implementaran metodologías que no requieren el uso de mercurio u otros elementos tóxicos, pues la principal motivación del uso de energía solar es su potencial de reducir drásticamente el impacto medioambiental de las actividades humanas.

La cocción solar es probablemente la aplicación de mayor factibilidad de esta tecnología. Tiene mejor rendimiento que la mayoría de las alternativas en el mercado, el precio es similar y existe dentro de la comunidad de usuarios de hornos solares una disposición a construir y diseñar prototipos para uso individual o familiar, necesario en este caso.

El proyecto que inspiró este trabajo, la impresora solar 3D, requiere temperaturas superiores a las teóricamente posibles por el prototipo debido a sus características ópticas. Para implementarlo se requiere un lente con mayor área u otro elemento óptico que enfoque en un área menor sin afectar significativamente la transmisión del equipo. Pero volviendo a estudiar el proyecto original, su objetivo era artístico, no práctico. El material obtenido no es utilizable para la manufactura de herramientas o productos, pues es frágil y abrasivo, dejando residuos de material particulado peligroso si es ingerido o aspirado. El fin del Solar Sinter es inspirar mostrando lo que es posible si se considera la energía solar como un elemento a manipular, ya sea para fines prácticos como la mayoría de las tecnologías mencionadas en este documento, o con una visión artística, creando esculturas de gran complejidad de un material inusual. Estas obras de arte tienen valor por el método utilizado para crearlas. Se podrían obtener resultados similares utilizando un soplete para derretir la arena pero se pierde el propósito que le brinda belleza al material áspero e irregular resultante.

Y respecto al objetivo de inspirar, este trabajo es evidencia de su éxito pues el descubrimiento de la impresora solar 3D cambió radicalmente el enfoque de este documento. Se espera que a futuro este trabajo también produzca interés y motivación para labores solares.

## 6. Bibliografía

- [1] Equipo de trabajo Proyecto Solar Energy: Sustainable Development for Arica & Parinacota "*Informe: Línea base en aplicaciones, oportunidades y selección preliminar.*" SERC CHILE, Santiago, Chile, 2015.
- [2] Fix, J. "*Astronomy: Journey to the Cosmic Frontier*" 5ª edición. University of Alabama, Huntsville, 2008
- [3] Rothery, D., Gilmour, I., Sephton, M. "*An introduction to Astrobiology*" Revised Edition. Open University, Milton Keynes, UK. 2011
- [4] Vergara, C. "*Adaptador de impedancia para fuentes fotovoltaicas.*" Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2008
- [5] JASolar Holdings Co. "JAP6 72/295-315/3BB module datasheet." 2013
- [6] Román, R. "Sistemas Solares Activos y Pasivos: Un Repaso Tecnológico" Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2009
- [7] Rajesh, A.M., Bharath, K.N., Bab u Kumar, B.R. "Design and Performance Evaluation of Hybrid Solar Still" 2009
- [8] Balachandaran, M.K., Rajaji, L. "Design of Energy Efficient Low Cost Solar Concentrators." INDICON 2014
- [9] Karroute, S., Chaker, A. "Theoretical and Numerical Study of the Effect of Coupling a Collector and Reflector on the Solar Still Efficiency" IREC 2014
- [10] Abd Malek, N., Abd Rahman, A., Hasini, H., Mohd jaafar, M.N. "*An Improved Solar PV System for Malaysian Rural Electrification*" IEEE SCORed 2010.
- [11] Trautz, K. et al, Hoheisel, R., Tavarti, R. et al. "*High Efficiency Flexible Solar Panels*" George Washington University, Washington, DC, USA 2013
- [12] Arshad, R., Tariq, S., Umair Niaz, M., Jamil, M. "Improvement in Solar Panel Efficiency Using Solar Concentration by Simple Mirrors and by Cooling." iCREATE 2014
- [13] Rahman, R., Khan, F. "Performance Enhancement of PV Solar System by Mirror Reflection." ICECE 2010

- [14] Anand, V.P., Khan, M., Ameen, E., Amuthan, V., Pesala, B. "*Performance Improvement of Solar Module System using Flat Plate Reflectors*" CSIR, Chennai, India 2013
- [15] Bakyalakshmi Nisha, R., Madhumitha, S. "*Solar Food Processor*" ICCCE 2010
- [16] Philibert, C. "THE PRESENT AND FUTURE USE OF SOLAR THERMAL ENERGY AS A PRIMARY SOURCE OF ENERGY" International Energy Agency, Paris, France 2005
- [17] Duffie, J. Beckman, W. "*Solar Engineering of Thermal Processes*" Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, USA 2013
- [18] Quinteros, J. "*Estudio Teórico y Experimental de Colector Solar Parabólico Para Generación de Energía Eléctrica.*" Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2008
- [19] <http://www.dezeen.com/2011/06/28/the-solar-sinter-by-markus-kayser/> , dezeen Magazine, 2011.
- [20] <http://walker.dgf.uchile.cl/Explorador/Solar3/> Explorador solar, Ministerio de Energía, Chile.
- [21] [ftp://dgf.uchile.cl/pub/rgarreau/ESTACION\\_DGF/](ftp://dgf.uchile.cl/pub/rgarreau/ESTACION_DGF/) Estación meteorológica, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2015
- [22] Poblete, D. "Identidad y Patrimonio Oral de los Mineros Pirquineros de Petorca, V Región de Valparaíso, Chile" Doctor en Antropología Social, FONDART 2011, <http://pirquinerosdepetorca.blogspot.cl/>
- [23] Wikipedia Commons
- [24] L298 DUAL FULL-BRIDGE DRIVER Datasheet, ST Electronics
- [25] [www.knightrobotics.cl](http://www.knightrobotics.cl)
- [26] <https://www.google.cl/maps>
- [27] <http://www.powerfromthesun.net/Book/chapter08/chapter08.html>
- [28] VNH2SP30-E AUTOMOTIVE FULLY INTEGRATED H-BRIDGE MOTOR DRIVER, ST Electronics

- [29] P. Bobenrieth, I. Cáceres, A. López, *Taller de Proyecto "Sistema seguimiento Concentrador solar"* Universidad de Chile, 2014
- [30] D. Balbontin, J. Ortiz, M. Núñez, *Impresora 3D Solar* Universidad de Chile, 2016
- [31] [www.gastronomiasolar.com](http://www.gastronomiasolar.com)

## 7. Anexo A

La primera figura muestra un diagrama del circuito fotosensible esencial del sistema de seguimiento. Consiste de una imagen representativa de una protoboard con 4 circuitos compuestos por una fotorresistencia en serie con una resistencia, formando un divisor de voltaje que se monitorea en el Arduino. También incluye 2 potenciómetros que permiten regular la tolerancia en la diferencia que hace actuar al sistema de seguimiento y el intervalo de tiempo entre cada evaluación.

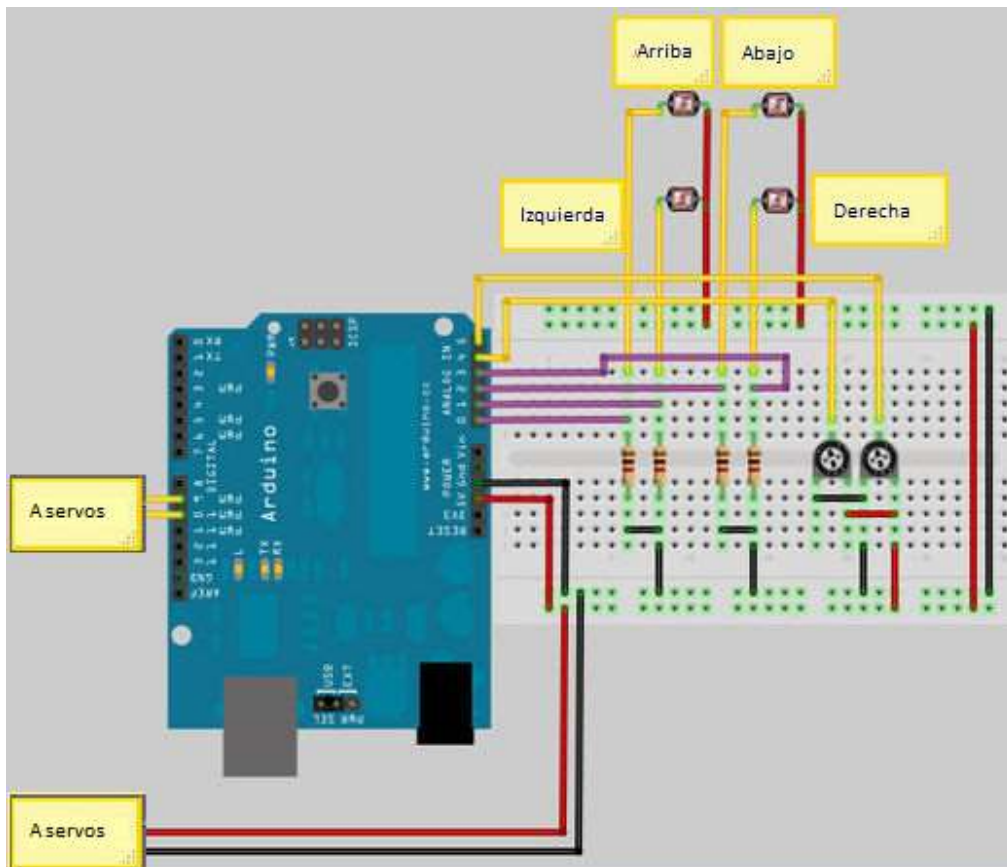


Figura 59 Circuito sensor y arduino

Las siguientes figuras muestran el circuito anterior en la realidad. Durante el funcionamiento del prototipo, las fotorresistencias no se fijan en la protoboard, se encuentran en los costados del marco metálico del lente, con cables de 150 a 200 cm conectándolas a la protoboard.

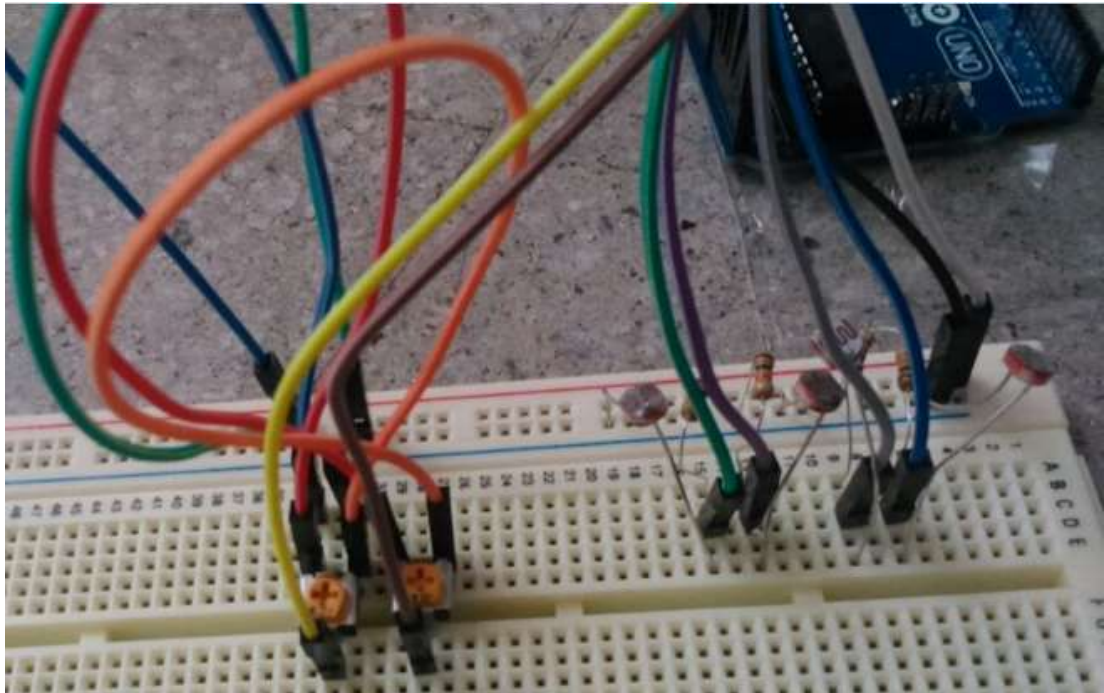


Figura 60 Fotorresistencias y potenciómetros

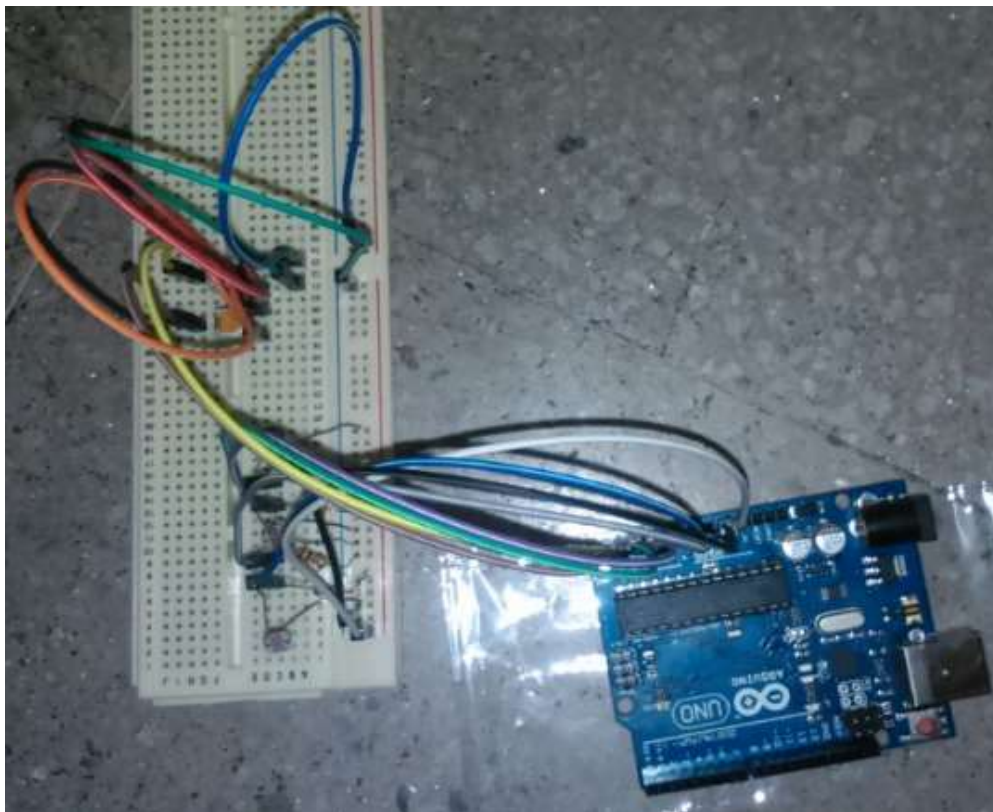


Figura 61 Circuito sensor

La figura muestra el diagrama de bloques del circuito integrado que es la pieza central del puente controlador de los motores servo.

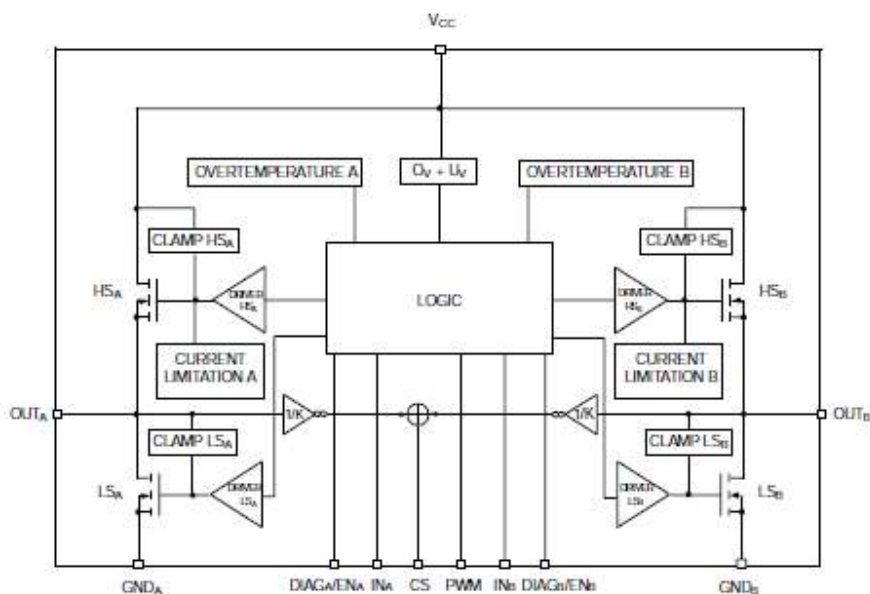


Figura 62 Diagrama de bloques VN12SP30

La siguiente figura muestra la cadena y catalina del sistema de movimiento horizontal. Al estar paralelo al piso, la gravedad provoca inestabilidad que impide su uso. Resulta en dificultades para usar el seguimiento automático.



Figura 63 Cadena-catalina horizontal



La última figura muestra el circuito de seguimiento automático. En la protoboard se inserta el cableado a las fotorresistencias. A la derecha fuera de la imagen se encuentra la batería de 12 [V] que alimenta los controladores de motor. El arduino y el circuito lógico están alimentados por el L298N en su salida de 5 [V].

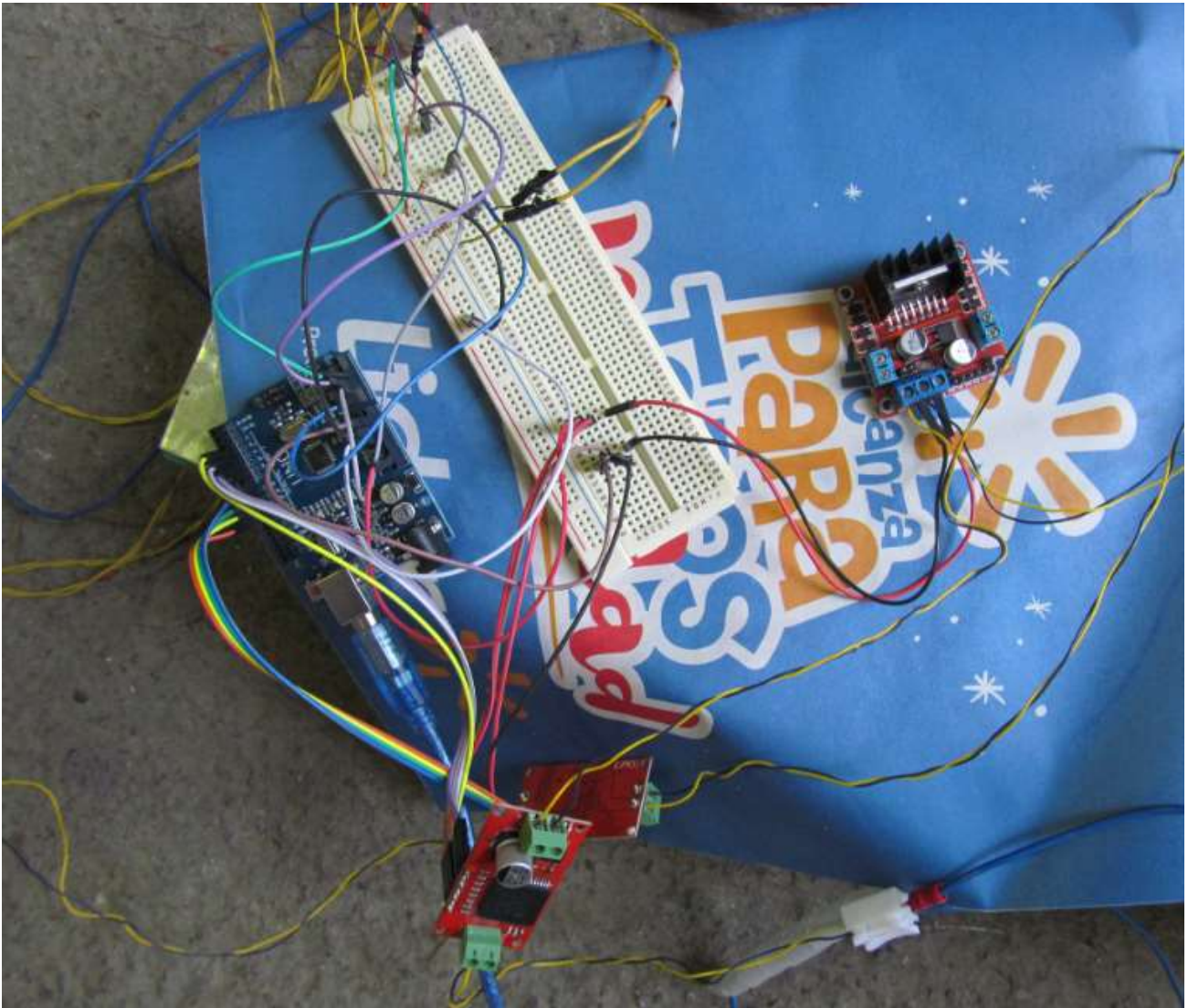


Figura 64 Circuito final de control y seguimiento



## 8. Anexo B Código Arduino

```
//Entradas
int right=0;    //LDR right
int left=1;    //LDR left
int up=2;      //LDR up
int down=3;    //LDR down

int MH_EN=3,MH_INB=4,MH_INA=5,MH_PWM=6; //Horizontal control outputs
int MV_EN=7,MV_INB=8,MV_INA=9,MV_PWM=10; //Vertical control outputs

int der, izq, arr, aba, dt, tol, ver, hor;

void setup()
{
    Serial.begin(9600);
}

void MoveMotor_H(char M)
{
    switch(M)
    {
        case 'L':
        {
            digitalWrite(MH_EN, HIGH);
            digitalWrite(MH_INB,LOW);
            digitalWrite(MH_INA,HIGH);
            digitalWrite(MH_PWM,HIGH);
            break;
        }
        case'R':
        {
            digitalWrite(MH_EN, HIGH);
            digitalWrite(MH_INB,HIGH);
            digitalWrite(MH_INA,LOW);
            digitalWrite(MH_PWM,HIGH);
            break;
        }
        case 'O':
        {
            digitalWrite(MH_EN, HIGH);
            digitalWrite(MH_INB,HIGH);
            digitalWrite(MH_INA,HIGH);
            digitalWrite(MH_PWM,HIGH);
            break; }
        }
    }
}

void MoveMotor_V(char M) //Funcion que mueve al motor vertical (Motor2)
{
    switch(M)
    {
        case 'D':    //M=caracter D, motor se mueve abajo
        {
            digitalWrite(MV_EN, HIGH);
            digitalWrite(MV_INB,LOW);
            digitalWrite(MV_INA,HIGH);
            digitalWrite(MV_PWM,HIGH);
            break; }
        case 'U':    //M=caracter U, motor se mueve arriba
```

```

{
digitalWrite(MV_EN, HIGH);
digitalWrite(MV_INB,HIGH);
digitalWrite(MV_INA,LOW);
digitalWrite(MV_PWM,HIGH);
    break; }
}
case 'O':    //M=caracter O, motor se detiene
{
digitalWrite(MV_EN, HIGH);
digitalWrite(MV_INB,HIGH);
digitalWrite(MV_INA,HIGH);
digitalWrite(MV_PWM,HIGH);
    break; }
}
}

void loop()
{
int der = analogRead(right);
int izq = analogRead(left);
int arr = analogRead(up);
int aba = analogRead(down);

int dt = 100;//tiempo entre operaciones en milisegundos
int tol = 200;//tolerancia, 5V=1023 ie cada 1 es aprox 5 mV

int ver = arr - aba;    //diferencia vertical
int hor = der - izq;    //diferencia horizontal

if (-1*tol > ver || ver > tol)
{
    if (arr>aba)
    {MoveMotor_V('U');}

    else
    {MoveMotor_V('D');}
}
else
{MoveMotor_V('O');}

if (-1*tol > hor || hor > tol)
{
    if (izq>der)
    {MoveMotor_H('L');}

    else
    {MoveMotor_H('R');}
}
else
{MoveMotor_H('O');}

delay(dt);
}

```