



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

**CONTRIBUCIÓN AL DESARROLLO EN CHILE DE COCINA SOLAR CON  
REFLECTOR PARABÓLICO**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO

PABLO IGNACIO MARCHANT MARTÍNEZ

PROFESOR GUÍA:  
RODRIGO PALMA BEHNKE

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
ANDRÉS CABA RUTTE  
ATUL SAGADE

SANTIAGO DE CHILE  
2022

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO  
POR: PABLO IGNACIO MARCHANT MARTÍNEZ  
FECHA: 2022  
PROF. GUÍA: RODRIGO PALMA BEHNKE

## **CONTRIBUCIÓN AL DESARROLLO EN CHILE DE COCINA SOLAR CON REFLECTOR PARABÓLICO**

La crisis medioambiental que existe hoy en día ha obligado a la humanidad a encontrar nuevas formas de generar la energía que necesitamos día a día de forma limpia. Es por esta razón que el desarrollo de nuevas tecnologías no contaminantes es necesario para lograr generar la energía con que estamos acostumbrados a vivir, sin tener que recurrir a las soluciones que dependen de recursos fósiles, o sufrir las consecuencias de eliminar las tecnologías contaminantes de golpe.

Uno de los recursos no contaminantes más abundantes y de fácil acceso es la radiación solar. Es por esto que en el mundo se desarrollan nuevas formas de aprovechar esta energía, y como Chile posee un gran flujo de radiación solar en su territorio, esto incentiva el desarrollo e implementación de tecnologías que aprovechen la energía solar.

En este contexto, se define como objetivo general de este trabajo realizar un modelo computacional de un diseño de cocina solar ya construido en India, y con este realizar simulaciones para determinar el desempeño de la cocina dentro de Chile. Asimismo, se propone una plataforma con seguimiento solar en la que se puedan ubicar un grupo de estas cocinas con el fin de mejorar el desempeño que estas tengan a lo largo de todo Chile.

A partir de los antecedentes recopilados en relación a la radiación solar, tipos de pérdidas de calor, descripción de cocinas solares y sistemas de seguimiento; se realiza una modelación de la cocina solar seleccionada. Para este fin se utiliza la herramienta de análisis COMSOL. Con ello se procede a la validación del modelo con los resultados previos reportados con datos de medición reales, considerando el diseño sin espejo inferior y con la inclusión del mismo. Las temperaturas alcanzadas son en torno a los 90°C en 60 min. Se deja constancia que el modelo desarrollado tiende a subestimar las temperaturas alcanzadas en el rango de interés. Asimismo, se muestra el efecto de utilizar un sistema de seguimiento comparado con el desempeño de la cocina en una posición fija. Con este antecedente, se propone un diseño de un sistema de seguimiento, capaz de contener 5 cocinas solares en una plataforma giratoria. Se presentan los detalles constructivos y los requerimientos energéticos asociados a su implementación utilizando un motor de tipo portón. El desempeño también se verifica a través de COMSOL, asimismo se determina un consumo en torno a los 8,3 Wh/día. Por último, se establecen tres zonas en Chile en las que se podría ubicar la cocina solar. Se determina el desempeño en cada una de las zonas, verificándose la viabilidad de la misma, alcanzando temperaturas en torno a los 100°C; y diferencias en los tiempos de cocción, que en el caso del sur pueden ser el doble del tiempo comparado con la zona norte.

Como trabajo futuro se plantea el refinamiento de los modelos a partir de la implementación de la solución y contraste con el desempeño real. Asimismo, se sugiere ajustar el diseño para mejorar el desempeño en la zona sur de Chile.

# Agradecimientos

Primero quiero agradecer a mis padres por el apoyo brindado durante toda mi vida, y en especial estos últimos meses que han sido difíciles para todos, aun así siempre he podido contar con su cariño y compañía.

A mi familia por brindarme su apoyo siempre. Su compañía y preocupación ha sido una fuente de fortaleza para lograr las metas que me he propuesto y que la vida ha dispuesto. Siempre es reconfortante saber que están ahí cuando las cosas se ponen cuesta arriba.

A mis amigos que me han acompañado desde el colegio y los que he conocido en este periodo universitario, como olvidar tantos momentos buenos que he vivido junto a ellos y espero que sigan siendo muchos más.

A mi Pau, por darme mucho cariño, apoyo y compañía todos estos años. Agradezco que la vida nos haya unido y que esta etapa se haya hecho mucho más gratificante gracias a tu amor y comprensión.

A los profesores que hicieron agradable, entretenida y desafiante aprender la materia que enseñaban, que mostraban empatía hacia su alumnado, priorizando siempre la enseñanza por sobre las demás cosas.

Agradecer en especial la ayuda y guía prestada por el profesor Rodrigo Palma y Atul Sagade, cuyo conocimiento fue muy valioso al momento de realizar este trabajo, desde lo trivial hasta lo más complejo de su realización.

A todos los que me acompañaron y dieron apoyo en el desarrollo de este trabajo.

Finalmente, se agradece el financiamiento parcial del proyecto FONDECYT N°1211968.

# Tabla de Contenido

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. Introducción</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1. Motivación . . . . .  | 1         |
| 1.2. Objetivos y alcance . . . . .   | 2         |
| 1.2.1. Objetivo general . . . . .  | 2         |
| 1.2.2. Objetivos específicos . . . . .   | 2         |
| 1.3. Alcance . . . . .   | 2         |
| 1.4. Estructura del documento . . . . .  | 3         |
| <b>2. Antecedentes</b>   | <b>4</b>  |
| 2.1. Radiación solar . . . . .   | 4         |
| 2.1.1. Espectro de radiación solar . . . . .   | 4         |
| 2.1.2. Ángulo de incidencia de radiación solar . . . . .                             | 5         |
| 2.1.3. Efecto invernadero . . . . .  | 5         |
| 2.1.4. Radiación global . . . . .  | 6         |
| 2.1.5. Pérdidas en reflexión . . . . .   | 7         |
| 2.2. Pérdida de calor . . . . .  | 7         |
| 2.3. Tipos de cocinas solares . . . . .  | 8         |
| 2.3.1. Cocinas solares de paneles . . . . .  | 8         |
| 2.3.2. Cocinas solares de caja . . . . .   | 9         |
| 2.3.3. Cocinas solares parabólicas . . . . .   | 9         |
| 2.3.4. Cocinas solares de tubo al vacío . . . . .                                    | 10        |
| 2.3.5. Cocinas solares de canal . . . . .  | 10        |
| 2.3.6. Cocinas solares con espejos en arreglo . . . . .                              | 11        |
| 2.3.7. Cocinas solares con lente Fresnel . . . . .                                   | 11        |
| 2.3.8. Cocinas solares con reflector inferior . . . . .                              | 12        |
| 2.4. Sistemas de seguimiento . . . . .   | 12        |
| 2.4.1. Seguidor solar de un eje horizontal(HSAT) . . . . .                           | 13        |
| 2.4.2. Seguidor solar de un eje horizontal inclinado (HTSAT) . . . . .               | 13        |
| 2.4.3. Seguidor solar de un eje vertical (VSAT) . . . . .                            | 14        |
| 2.4.4. Seguidor solar de un eje vertical inclinado (VTSAT) . . . . .                 | 14        |
| 2.4.5. Seguidor solar de dos ejes(AADAT) . . . . .                                   | 14        |
| 2.5. Descripción de la cocina solar seleccionada y su modelo computacional . . . . . | 15        |
| <b>3. Propuesta metodológica</b>   | <b>16</b> |
| 3.1. Descripción general . . . . .   | 16        |
| 3.2. Información de entrada . . . . .  | 17        |
| 3.2.1. Radiación solar en zonas de interés . . . . .                                 | 17        |

|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| 3.2.2.    | Selección de cocina solar a considerar . . . . .                 | 18        |
| 3.3.      | Validación de la cocina simulada . . . . .                       | 19        |
| 3.4.      | Simulación de análisis térmico de la cocina solar . . . . .      | 20        |
| 3.4.1.    | Cocina con espejo vs. sin espejo . . . . .                       | 20        |
| 3.4.2.    | Cocina con tracker vs. sin tracker . . . . .                     | 21        |
| 3.5.      | Diseño y simulación de sistema de seguimiento . . . . .          | 21        |
| 3.5.1.    | Componentes y armado de seguidor solar . . . . .                 | 21        |
| 3.5.2.    | Simulación de seguimiento solar . . . . .                        | 21        |
| 3.5.3.    | Cálculo de torque y energía de funcionamiento . . . . .          | 22        |
| 3.6.      | Análisis integrado por zona . . . . .                            | 22        |
| 3.6.1.    | Zona norte . . . . .   | 22        |
| 3.6.2.    | Zona centro . . . . .  | 22        |
| 3.6.3.    | Zona sur . . . . .   | 22        |
| 3.7.      | Implementación . . . . .   | 23        |
| <b>4.</b> | <b>Aplicación de casos</b>                                       | <b>24</b> |
| 4.1.      | Descripción general . . . . .                                    | 24        |
| 4.2.      | Información de entrada . . . . .                                 | 24        |
| 4.2.1.    | Radiación por zona . . . . .                                     | 24        |
| 4.2.1.1.  | Zona norte . . . . .   | 24        |
| 4.2.1.2.  | Zona centro . . . . .  | 25        |
| 4.2.1.3.  | Zona sur . . . . .   | 26        |
| 4.2.2.    | Utilización de COMSOL para análisis de radiación solar . . . . . | 28        |
| 4.3.      | Validación de la cocina solar simulada . . . . .                 | 29        |
| 4.3.1.    | Comparación de muestras reales con simuladas . . . . .           | 29        |
| 4.3.2.    | Manejo con COMSOL para validación . . . . .                      | 32        |
| 4.4.      | Análisis térmico de la cocina solar . . . . .                    | 33        |
| 4.4.1.    | Cocina con espejo vs. sin espejo . . . . .                       | 33        |
| 4.4.2.    | Cocina con tracker vs. sin tracker . . . . .                     | 34        |
| 4.5.      | Propuesta de plataforma con seguidor solar . . . . .             | 36        |
| 4.5.1.    | Componentes y armado de seguidor solar . . . . .                 | 36        |
| 4.5.2.    | Simulación de seguimiento solar . . . . .                        | 38        |
| 4.5.3.    | Cálculo de torque y energía de funcionamiento . . . . .          | 40        |
| 4.6.      | Análisis por zona en Chile . . . . .                             | 42        |
| 4.6.1.    | Caso en zona norte . . . . .                                     | 42        |
| 4.6.2.    | Caso en zona centro . . . . .                                    | 44        |
| 4.6.3.    | Caso en zona sur . . . . .                                       | 46        |
| <b>5.</b> | <b>Conclusiones y trabajo futuro</b>                             | <b>49</b> |
| 5.1.      | Conclusiones . . . . .   | 49        |
| 5.2.      | Trabajo futuro . . . . .   | 50        |
|           | <b>Bibliografía</b>  | <b>52</b> |
|           | <b>Anexo A. Datos y tablas</b>                                   | <b>54</b> |
| A.1.      | Motor . . . . .  | 54        |
| A.2.      | Datos reales . . . . .   | 55        |
| A.3.      | Datos para simulaciones y resultados . . . . .                   | 61        |

# Índice de Tablas

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 4.1.  | Tabla de pesos. . . . .                        | 40 |
| A.1.  | Datos reales sin espejo primera parte. . . . . | 56 |
| A.2.  | Datos reales sin espejo segunda parte. . . . . | 57 |
| A.3.  | Datos reales sin espejo tercera parte. . . . . | 58 |
| A.4.  | Datos reales con espejo primera parte. . . . . | 59 |
| A.5.  | Datos reales con espejo segunda parte. . . . . | 60 |
| A.6.  | Radiación zona norte anual. . . . .            | 61 |
| A.7.  | Radiación zona centro anual. . . . .           | 62 |
| A.8.  | Radiación zona sur anual. . . . .              | 62 |
| A.9.  | Con vs. sin reflector. . . . .                 | 63 |
| A.10. | Sin vs. con tracker. . . . .                   | 63 |
| A.11. | Caso estudio zona norte. . . . .               | 64 |
| A.12. | Caso estudio zona centro. . . . .              | 64 |
| A.13. | Caso estudio zona sur. . . . .                 | 65 |

# Índice de Ilustraciones

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 2.1.  | Espectro de radiación solar [12]. . . . .                          | 4  |
| 2.2.  | Ángulo de los rayos solares en la Tierra [13]. . . . .             | 5  |
| 2.3.  | Efecto invernadero [5]. . . . .                                    | 6  |
| 2.4.  | Radiación directa y difusa [16]. . . . .                           | 6  |
| 2.5.  | Pérdidas en la reflexión de los rayos de luz. . . . .              | 7  |
| 2.6.  | Pérdidas de calor por viento [9]. . . . .                          | 8  |
| 2.7.  | Cocinas solares de paneles [6]. . . . .                            | 9  |
| 2.8.  | Cocinas solares de caja [6]. . . . .                               | 9  |
| 2.9.  | Cocinas solares parabólicas [6]. . . . .                           | 10 |
| 2.10. | Cocinas solares de tubo vacío [6]. . . . .                         | 10 |
| 2.11. | Cocinas solares de canal [6]. . . . .                              | 11 |
| 2.12. | Cocinas solares en formación [6]. . . . .                          | 11 |
| 2.13. | Cocinas solares con lente Fresnel [6]. . . . .                     | 11 |
| 2.14. | Cocinas solares con reflector inferior [1]. . . . .                | 12 |
| 2.15. | Seguidor solar de un eje horizontal [7]. . . . .                   | 13 |
| 2.16. | Seguidor solar de un eje horizontal inclinado [7]. . . . .         | 13 |
| 2.17. | Seguidor solar de un eje vertical [7]. . . . .                     | 14 |
| 2.18. | Seguidor solar de un eje vertical inclinado [7]. . . . .           | 14 |
| 2.19. | Seguidor solar de dos ejes [8]. . . . .                            | 15 |
| 2.20. | Medidas reales y modelo usado en simulaciones. . . . .             | 15 |
| 3.1.  | Diagrama propuesta metodológica. . . . .                           | 17 |
| 3.2.  | Radiación solar en Chile. . . . .                                  | 18 |
| 3.3.  | Dimensiones cocina solar [1]. . . . .                              | 19 |
| 3.4.  | Modelo sin espejo vs. con espejo. . . . .                          | 21 |
| 4.1.  | Radiación solar zona norte. . . . .                                | 25 |
| 4.2.  | Radiación solar zona centro. . . . .                               | 26 |
| 4.3.  | Radiación solar zona sur. . . . .                                  | 27 |
| 4.4.  | Utilización de COMSOL para determinar concentración solar. . . . . | 28 |
| 4.5.  | Validación cocina simulada sin espejo inferior. . . . .            | 30 |
| 4.6.  | Validación cocina simulada con espejo inferior. . . . .            | 31 |
| 4.7.  | Utilización de COMSOL para validar modelo. . . . .                 | 32 |
| 4.8.  | Comparación cocina solar con espejo vs. sin espejo. . . . .        | 34 |
| 4.9.  | Comparación cocina solar con tracker vs. sin tracker. . . . .      | 35 |
| 4.10. | Componentes y armado del seguidor solar. . . . .                   | 37 |
| 4.11. | Lógica de control de seguimiento solar. . . . .                    | 38 |
| 4.12. | Seguimiento solar a lo largo del día. . . . .                      | 39 |
| 4.13. | Diagrama de torques. . . . .                                       | 41 |
| 4.14. | Caso de estudio en zona norte. . . . .                             | 43 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 4.15. | Caso de estudio en zona centro. . . . . | 45 |
| 4.16. | Caso de estudio en zona sur. . . . .    | 47 |
| A.1.  | Imagen motor propuesto. . . . .         | 54 |
| A.2.  | Características del motor. . . . .      | 55 |

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Motivación

En los sitios con menos recursos se tiene el hábito de cocinar en hornos a madera, ya que es lo más accesible y barato disponible, lo que conlleva problemas de contaminación tanto por el  $\text{CO}_2$  que producen al quemar la leña como por el material particulado que contribuye a la formación de la capa de smog en las ciudades. Por otro lado, están las poblaciones más alejadas que tienen un mal acceso a los combustibles utilizados para el funcionamiento de los hornos convencionales a gas, cuyo costo es alto para una comunidad de bajos recursos.

A partir de esta problemática es que proviene la tecnología de las cocinas solares, dado que son una alternativa de bajo costo y no produce contaminación; es la solución ideal para hogares o comunidades en los que se cuenta con pocos recursos. Si consideramos que en el mundo 3.000 millones de personas usan hornos a madera [6] se tiene una población objetivo enorme, por consiguiente, el impacto de la utilización de las cocinas solares podría disminuir la cantidad de  $\text{CO}_2$  y material particulado que contamina las ciudades en una gran proporción y, del mismo modo, disminuir tala de los árboles cuya madera se utiliza para cocinar, disminuyendo aún más la huella de carbono producida por la quema de madera para la cocción de alimentos.

Conforme a la problemática recién mencionada es que surge la necesidad de incorporar y expandir la utilización de las cocinas solares dentro de las tecnologías limpias en Chile, ya que estas presentan una alternativa que no produce emisiones contaminantes y un relativo bajo costo de implementación. Es por esta razón que en el siguiente trabajo se efectuarán simulaciones para evaluar el desempeño de un modelo ya existente de cocina solar en las distintas regiones del territorio nacional. Se tomarán en cuenta la radiación solar, la temperatura ambiente, los efectos ópticos y la transmisión de calor para determinar su efectividad en la zona norte, centro y sur de Chile.

Por último, se plantea la implementación de una plataforma en la que se puedan colocar varias cocinas solares y que esta rote para hacer seguimiento solar. De este modo se logra extender las horas en las que se puede utilizar la cocina solar para la cocción de alimentos y cocinar en mayor volumen, ya que se cocinarían varios platos a la vez.

## **1.2. Objetivos y alcance**

### **1.2.1. Objetivo general**

El objetivo general de este trabajo es hacer un modelo computacional de un diseño de cocina solar construida en India, y con este realizar simulaciones para determinar el desempeño de la cocina dentro de Chile.

La finalidad de este trabajo es que un proyecto futuro pueda utilizar la información recopilada en este estudio, para así llevar a cabo la construcción en terreno de este tipo de cocina en el territorio nacional, dado el desempeño que estos presentan en las distintas zonas geográficas de Chile.

Por último, se propone una plataforma con seguimiento solar en la que se puedan ubicar un grupo de estas cocinas con el fin de mejorar el desempeño que estas tengan a lo largo de todo Chile.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

Para que se logre el objetivo general de este trabajo de título, se plantea desarrollar los siguientes objetivos específicos:

- Validar el modelo computacional haciendo una comparación entre los datos reales y los obtenidos de la simulación del modelo de cocina solar.
- Realizar cambios en las partes de la cocina solar simulada, para así comprobar el desempeño de la cocina solar, según los componentes que sean cambiados.
- Simular la construcción de una plataforma que realiza seguimiento solar.
- Calcular la energía necesaria para hacer girar la plataforma con seguidor solar en un día.
- Verificar el desempeño de la cocina en las zonas norte, centro y sur de Chile.

## **1.3. Alcance**

El alcance de este trabajo de título consiste en modelar y simular un tipo de cocina solar, realizando variaciones en los componentes que la constituyen, ubicándola en distintas zonas geográficas de Chile, y proponiendo la construcción de una plataforma con seguimiento solar en la que se puedan poner una o hasta cinco de estas cocinas simultáneamente.

Este trabajo tiene la finalidad de ser la base de un proyecto futuro que desee realizar la construcción en terreno de estas cocinas con la plataforma con seguimiento solar, por lo que los datos obtenidos a partir de las simulaciones deben ser lo más precisas posibles para que no haya problema en su implementación real.

## 1.4. Estructura del documento

En el capítulo 2 se presentarán los antecedentes donde se hace una revisión a los conceptos requeridos para la comprensión de los problemas en esta memoria, dentro de los cuales están los conceptos relacionados con la radiación solar, que es uno de los puntos centrales en la comprensión de los fenómenos ocurridos en este trabajo; también se entenderá un solo concepto de pérdida de calor que es relevante al momento de utilizar COMSOL; se presentarán tipos de cocinas solares que existen actualmente para tener una comprensión más extensa del estado del arte; se revisan los sistemas de seguimiento de 1 y 2 ejes, parte importante en el trabajo, ya que se desea implementar una plataforma que tenga sistema de seguimiento; y por último, se describe la cocina solar seleccionada con lo que quedan completos los antecedentes.

Luego se verá la propuesta metodológica, en donde se presentan los pasos a seguir y métodos realizados en el desarrollo de la experiencia. Primero se explica en forma general lo que se hará en grandes rasgos en el trabajo; luego se define la información de entrada, con lo cual se sustentará la memoria y todo el desarrollo de las siguientes etapas; en seguida se presenta la validación, punto fundamental del trabajo, ya que sin un modelo válido, todo lo que se haga con él será incorrecto; la simulación del análisis térmico determina que tan relevantes son las variables del espejo inferior y del seguidor solar para el proyecto; en diseño y simulación de sistema de seguimiento se propone una plataforma que contiene hasta 5 unidades de las cocinas solares antes mencionadas, para así hacer un seguimiento en conjunto; el análisis integrado por zona es donde concluye todo el aprendizaje obtenido en el desarrollo de esta memoria, ya que se debe hacer un estudio por zona escogida en Chile para simular el funcionamiento de las cocinas solares con espejo inferior y sistema de seguimiento solar.

Por último, se termina con caso de aplicación, en donde se muestran todos los resultados obtenidos de las etapas mencionadas en propuesta metodológica. Se empieza por una descripción general; luego se analiza la información de entrada, la validación de la cocina solar simulada, el análisis térmico de la cocina solar, la propuesta de plataforma con seguidor solar y por último, los análisis por zona en Chile, donde se concluye en qué partes de Chile conviene utilizar estas cocinas o en qué épocas conviene.

Finalmente, se presentan las conclusiones del trabajo realizado y si se cumplieron los objetivos.

# Capítulo 2

## Antecedentes

### 2.1. Radiación solar

En cuanto a la radiación, se deben tomar en cuenta distintos fenómenos para comprender los comportamientos que esta produce en la cocina solar, tanto en el espejo inferior como en el compartimiento interior de la cocina.

#### 2.1.1. Espectro de radiación solar

Primero se debe mencionar la radiación solar que llega a la superficie terrestre, ya que con esta radiación se verán los efectos producidos por la cocina solar y cómo es que esta calienta los alimentos en su interior.

Producto de que la Tierra tiene una atmósfera, no toda la luz que proviene del Sol llegará a la superficie terrestre. Esto se debe a que la mayoría de los compuestos que hay en la atmósfera absorben unas determinadas longitudes de onda de radiación solar [11], luego el espectro de radiación solar que se verá en la superficie terrestre tendrá espacios en su representación gráfica.

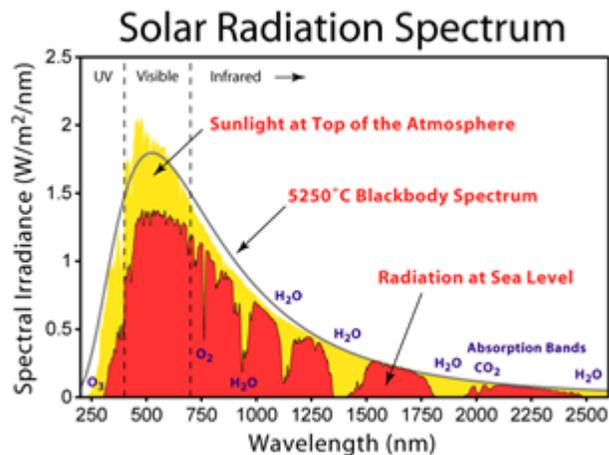


Figura 2.1: Espectro de radiación solar [12].

Se puede apreciar en la figura 2.1 lo mencionado anteriormente, el área roja es lo que co-

responde a la radiación en la superficie terrestre y la amarilla en la superficie exterior de la atmósfera, donde se ve que el agua y el CO<sub>2</sub> atmosférico absorben determinadas longitudes de onda provenientes del Sol, representado por las caídas de intensidad que hay en el espectro rojo.

### 2.1.2. Ángulo de incidencia de radiación solar

La Tierra, al estar inclinada en relación con el eje del Sol, según la hora y el día en el que se esté, van a llegar más o menos rayos a la superficie, como se puede ver la figura 2.2. Por ejemplo, en las mañanas los rayos del Sol llegan de forma inclinada a la superficie, por lo tanto, deberá atravesar una mayor cantidad de atmósfera para llegar a la superficie terrestre, lo que implica que se percibirá en la superficie una menor cantidad de radiación solar en estas horas [14]. Mientras que al mediodía pasa lo contrario, la radiación solar llega casi directamente desde arriba, por lo que hay una menor cantidad de partículas que disipen la radiación solar, es así como la radiación solar en la superficie aumenta.

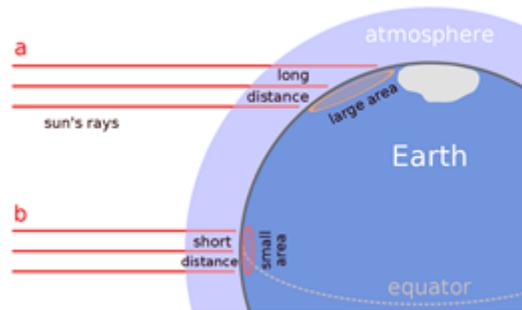


Figura 2.2: Ángulo de los rayos solares en la Tierra [13].

### 2.1.3. Efecto invernadero

El efecto invernadero se produce cuando hay una superficie opaca para una determinada longitud de onda, pero no para otra. En el caso del invernadero común, la luz infrarroja de longitud de onda corta atraviesa las paredes sin verse reflejada por estas. Sin embargo, una vez dentro del invernadero, este tipo de luz se ve reflejada y en el proceso pierde energía, por lo que su longitud de onda se hace más larga. Ahora la longitud de onda larga si se ve reflejada por las paredes internas del invernadero, por lo que se verá confinada a esta zona y entregando el resto de su energía a las superficies que haya en su interior [5]. Este proceso provoca el aumento de la temperatura de los objetos y aire dentro del invernadero.

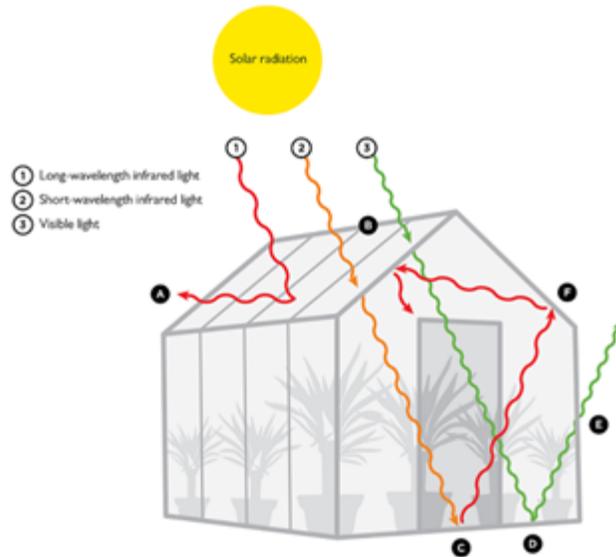


Figura 2.3: Efecto invernadero [5].

### 2.1.4. Radiación global

Se deben entender en esta sección la radiación global, directa y difusa, ya que son variables fundamentales para realizar el proyecto de la cocina solar.

La radiación directa es la que, como dice su nombre, viene directamente desde el Sol y que llega a la superficie terrestre de forma directa. La radiación difusa es la que llega a la superficie terrestre luego de haber sido dispersada por las partículas atmosféricas, estas ondas llegan desde toda la atmósfera, no solo donde se encuentra el Sol. En invierno la radiación difusa es mucho mayor, ya que en días nublados la mayor parte de la radiación que llega a la superficie es radiación difusa [17]. Finalmente, la radiación global es la suma entre la radiación directa y la radiación difusa. Estos fenómenos se ven representados en la figura 2.4.

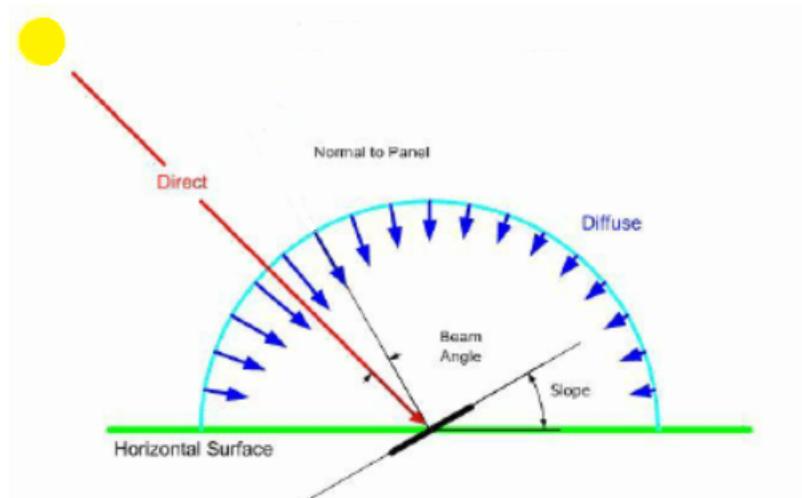


Figura 2.4: Radiación directa y difusa [16].

### 2.1.5. Pérdidas en reflexión

Como es de esperar, cualquier sistema real tiene pérdidas cuando interactúan los distintos mecanismos que lo componen, esto es consecuencia de que hay múltiples fenómenos interactuando entre sí, siendo algunos de estos más relevantes que otros según el fenómeno que se esté estudiando.

Los tipos de pérdidas que se deben tener en cuenta para este trabajo son:

- Las pérdidas por absorción de los materiales: Esta se produce cuando la reflexión de los rayos solares no es perfecta en el material, luego este absorbe una parte de la radiación incidente y es reflejada con una longitud de onda distinta de menor energía [15]. El efecto se ve representado en la figura 2.5.a.
- Las pérdidas producidas por la rugosidad del material: Esto se debe a que microscópicamente hablando cualquier material va a tener imperfecciones en su superficie (ver 2.5.b), luego esta imperfección hará que la reflexión del espejo no sea perfecta y esto produce que haya una pequeña pérdida por rayos mal reflejados[15].
- La proyección del Sol: Dado que el Sol tiene un área en el cielo terrestre, se produce que los rayos que provienen de él tengan un pequeño ángulo entre ellos, lo que implica que los rayos incidentes del Sol no están perfectamente alineados [15], esto hace que el reflejo proveniente de ellos esté levemente distorsionado. Una representación exagerada se puede ver en la figura 2.5.c, ya que en realidad el ángulo entre los rayos es mucho menor a los vistos en la figura.

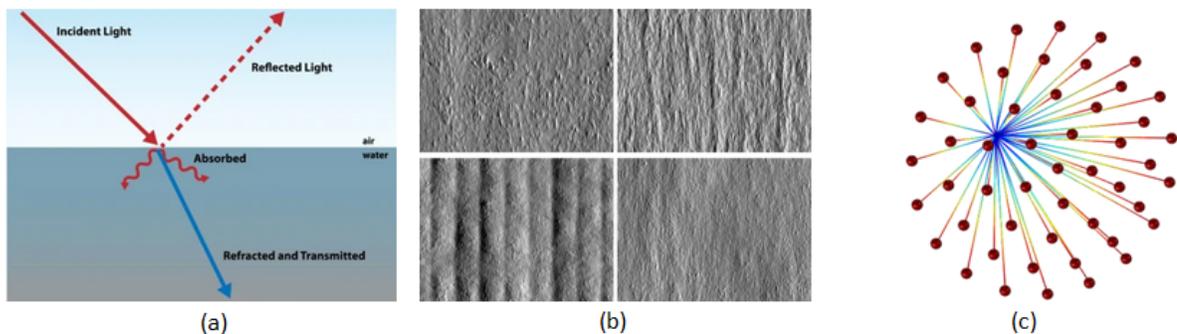


Figura 2.5: Pérdidas en la reflexión de los rayos de luz.

## 2.2. Pérdida de calor

El viento produce pérdidas de calor en los objetos que recorre. Esta pérdida de calor se determina según la diferencia de temperaturas que haya entre el viento y los objetos con que interactúa, por lo que es necesario saber el coeficiente de transferencia de calor por convección [9] para así determinar la cantidad de calor que se pierde por este fenómeno.

En el siguiente gráfico se muestran los valores de coeficientes según la velocidad del viento que haya en la zona.

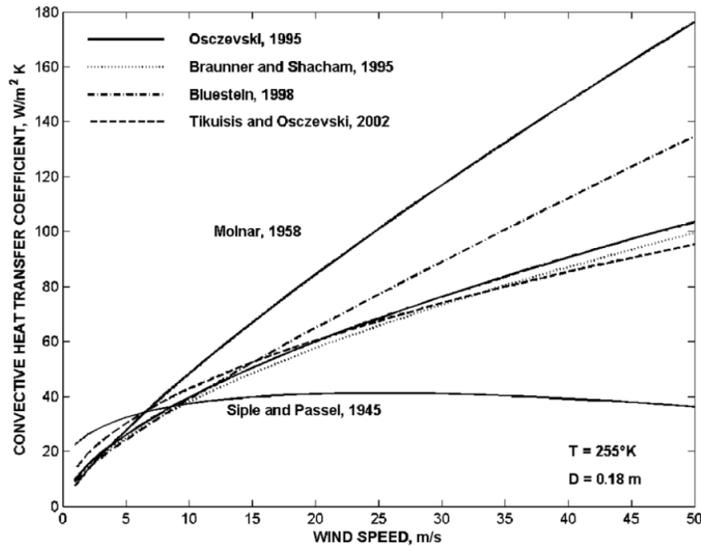


Figura 2.6: Pérdidas de calor por viento [9].

## 2.3. Tipos de cocinas solares

Las cocinas solares son una buena alternativa para zonas con alta radiación solar, ya que no es necesario que estas tengan una fuente de energía química como la leña o los combustibles fósiles, solo requieren que tengan tiempo de exposición al Sol directo por unas horas para lograr la cocción de los alimentos en su interior.

Es por esto que existen muchos tipos de cocinas solares, que van desde el rango de las muy baratas y fáciles de construir, a las muy caras y complejas. También varían según la portabilidad que se requiera de estas, ya que se tienen maletas que se convierten en cocinas solares, las cuales no tienen un buen desempeño, pero logran calentar comida y, por otro lado, están las cocinas estáticas que tienen un mejor desempeño gracias a su capacidad de concentrar los rayos solares, pero para lograr esta precisión es necesario que se tenga una construcción sólida.

Dado su costo, variedad y flexibilidad según su modelo, este tipo de cocinas cada vez se están construyendo más en zonas donde la radiación sea suficiente y que su uso sea conveniente. Además, tienen la ventaja de funcionar de manera ecológica, ya que su única fuente de energía es la radiación solar, por lo tanto, no producen emisiones de material particulado como las cocinas de leña o  $\text{CO}_2$  como las de gas y leña.

En seguida se mostrarán algunos tipos de cocinas solares junto con sus características y una breve descripción.

### 2.3.1. Cocinas solares de paneles

Esta cocina se caracteriza por ser económica, ya que se utilizan materiales reflectantes comunes y flexibles para hacer una parábola con ellos, y así dejar la olla que se quiera en el punto focal [6], como se ve en la figura 2.7.

Puede alcanzar temperaturas de hasta 100-140°C y es muy portable, ya que debido a los materiales que se ocupan, se puede plegar y transportar rápidamente.



Figura 2.7: Cocinas solares de paneles [6].

### 2.3.2. Cocinas solares de caja

Estas cocinas son una caja con placas reflectoras que apuntan los rayos del Sol hacia el interior de la caja donde se encuentra la olla para cocinar, como se puede ver en la imagen 2.8.

Hay algunas lo suficientemente grandes para que quepa más de una olla para cocinar y puede alcanzar temperaturas entre los 135-200°C [6].

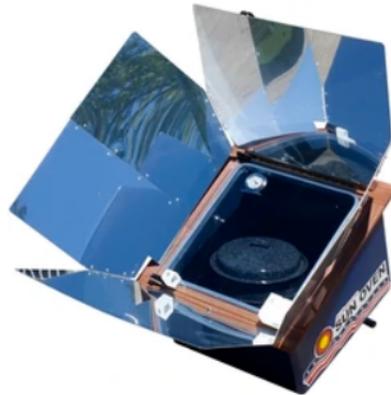


Figura 2.8: Cocinas solares de caja [6].

### 2.3.3. Cocinas solares parabólicas

Las cocinas solares parabólicas se componen por un espejo parabólico y en su foco se encuentra la olla [6]. Son más complejos de construir que las mencionadas anteriormente, pero son mucho más rápidas para calentar comida.

Tienen tiempos de cocción similares a cocinas tradicionales de leña y las temperaturas que alcanzan son entre los 120-230°C.

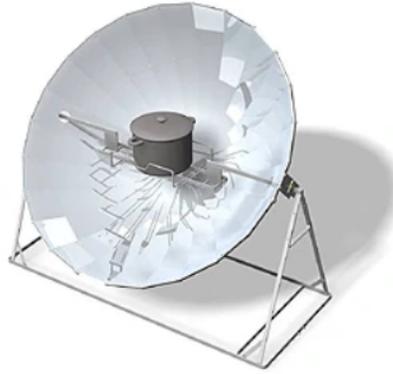


Figura 2.9: Cocinas solares parabólicas [6].

### 2.3.4. Cocinas solares de tubo al vacío

Estas cocinas tienen un tubo alargado en donde se cocina la comida, esto porque el punto focal es una línea en vez de un punto, luego la forma más eficiente de aprovechar la radiación incidente es usando un tubo. El tubo en el que se cocina la comida tiene una capa de vacío, esto para disminuir las pérdidas que se producen por la transferencia de calor.

El problema con estos tubos es que son muy delicados y, por lo tanto, se debe tener precaución al transportarlos [6]. Otra desventaja es que la comida debe ser cortada para que quepa dentro del tubo.



Figura 2.10: Cocinas solares de tubo vacío [6].

### 2.3.5. Cocinas solares de canal

Las cocinas solares de canal funcionan bajo el mismo principio que las de tubo al vacío, pero en estas el tubo no tiene vacío [6], por lo que puede ser más fácil su manejo y menos peligroso, considerando que puede ser un material transparente que es más duro que el vidrio.



Figura 2.11: Cocinas solares de canal [6].

### 2.3.6. Cocinas solares con espejos en arreglo

Estas cocinas tienen varios espejos planos colocados en un arreglo cuyo reflejo incide en un punto focal común, en el que es colocada la olla con comida.

Gracias a que se usan varios paneles planos, no es necesario tener algún espejo curvo que haga compleja y cara su implementación. Estos pueden alcanzar la misma temperatura que un reflector parabólico [6], que como vimos anteriormente son uno de los más rápidos en calentar comida.



Figura 2.12: Cocinas solares en formación [6].

### 2.3.7. Cocinas solares con lente Fresnel

Esta cocina funciona a base de lentes Fresnel que apuntan hacia un lugar en común, donde se coloca la comida.

La ventaja de estas cocinas es que los lentes Fresnel son planos, mientras que otro tipo de lente son curvos si se quiere tener un foco puntual [6]. Además, estos lentes son relativamente livianos y se pueden configurar en distintas disposiciones según sea requerido.



Figura 2.13: Cocinas solares con lente Fresnel [6].

### 2.3.8. Cocinas solares con reflector inferior

Estos tipos de cocinas se caracterizan por tener un espejo curvo cuyo foco apunta hacia la superficie inferior del compartimiento donde se coloca la olla con comida.

La ventaja de este tipo de cocina es que aprovechan la radiación solar para apuntarla donde no llega luz, es así como, por una cara incide la radiación solar directa y por la otra la radiación solar enfocada [1].

La desventaja es que la mitad del espejo queda cubierto por la sombra que produce el compartimiento de comida, por lo que disminuye ligeramente su eficiencia.

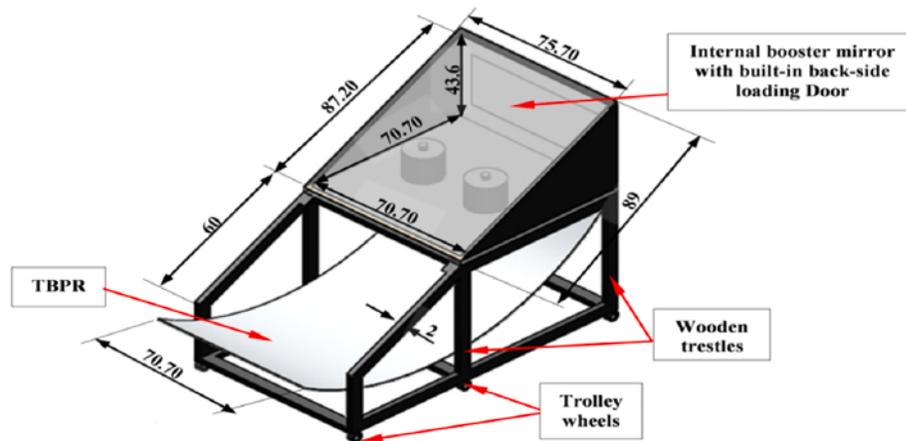


Figura 2.14: Cocinas solares con reflector inferior [1].

## 2.4. Sistemas de seguimiento

Los sistemas de seguimiento solar son útiles al momento de aumentar la energía que se quiera obtener a partir del Sol. Esto es porque, la gran mayoría de sistemas que aprovechan la radiación solar, necesitan seguir la dirección del Sol para recibir los rayos incidentes de forma directa, y así maximizar la eficiencia de la tecnología ocupada.

Es por esto que se requiere de un sistema que calcule la posición solar, en función de la zona en que se quieran hacer las medidas y la hora global. Con estos datos de entrada se puede resolver la ecuación 2.1. Una vez calculado el ángulo de incidencia, ya se puede decidir la posición que debe tener y recorrer el aparato.

Para calcular el ángulo de incidencia se debe resolver la siguiente ecuación [10]:

$$\cos\theta = \cos\beta_Z + \text{sen}\beta\text{sen}\theta_Z\cos(\gamma_S - \gamma) \quad (2.1)$$

Donde  $\theta_Z$  y  $\gamma_S$  son los ángulos del cenit y azimut solar, estos pueden ser calculados a partir de la hora y del lugar donde se quieran hacer las mediciones.

Los sistemas de seguimiento pueden ser de 1 o 2 ejes según el capital de que se disponga y de las características climáticas y geográficas de la zona en que se coloquen. Los sistemas de seguimiento son los siguientes:

#### 2.4.1. Seguidor solar de un eje horizontal(HSAT)

Como se puede ver en la figura 2.15, estos paneles tienen el eje en el plano horizontal. Estos seguidores son comúnmente utilizados en aplicaciones fotovoltaicas, ya que es uno de los sistemas de seguimiento más costo eficiente que hay [7]. Se requiere menos material en su construcción y el eje horizontal es una de las configuraciones más eficientes de seguimiento, si se compara con los otros sistemas.

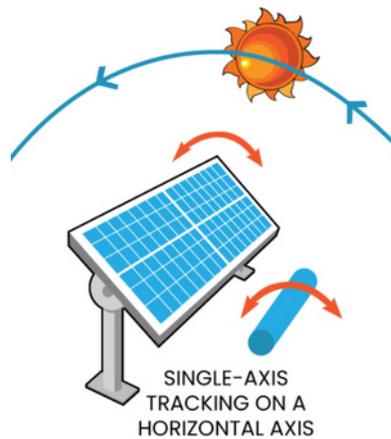


Figura 2.15: Seguidor solar de un eje horizontal [7].

#### 2.4.2. Seguidor solar de un eje horizontal inclinado (HTSAT)

Similar al seguimiento horizontal mencionado anteriormente, solo que en este caso hay un ángulo con respecto a la horizontal. Requiere una base sólida que aumenta su costo, y su construcción no es escalable [7].

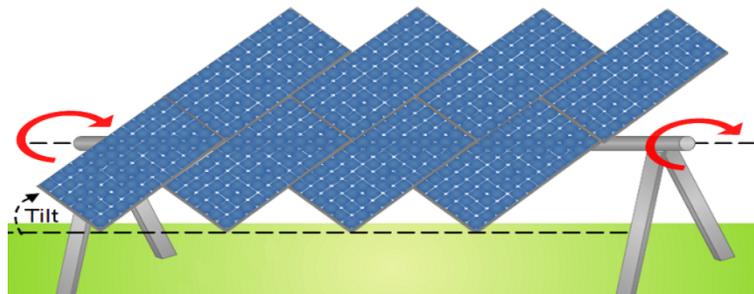


Figura 2.16: Seguidor solar de un eje horizontal inclinado [7].

### 2.4.3. Seguidor solar de un eje vertical (VSAT)

Estos sistemas siguen el movimiento hacia "arriba y abajo" del Sol. Se utilizan más frecuentemente en lugares de gran altitud o de latitudes extremas [7]. Tienen un costo de instalación similar al seguimiento con eje horizontal, pero son más eficientes en lugares específicos, como los mencionados anteriormente.

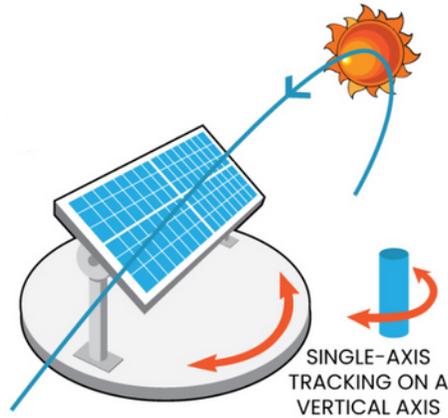


Figura 2.17: Seguidor solar de un eje vertical [7].

### 2.4.4. Seguidor solar de un eje vertical inclinado (VTSAT)

El seguidor solar con eje vertical inclinado tiene el ángulo de ladeo con el eje horizontal, y rota en un eje vertical, como se puede ver en la figura 2.18 [7]. Estos seguidores producen más energía que los seguidores horizontales, pero el viento es un problema para este sistema por su ladeo, entonces también necesita una base sólida que aumenta su costo de instalación.

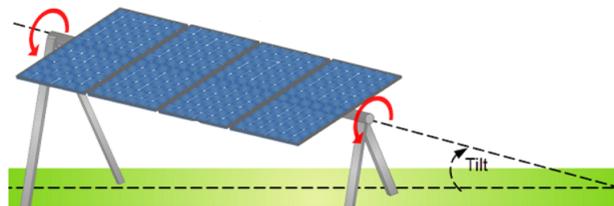


Figura 2.18: Seguidor solar de un eje vertical inclinado [7].

### 2.4.5. Seguidor solar de dos ejes(AADAT)

Este tipo de seguidor solar es el más eficiente, ya que puede apuntar directamente al Sol donde sea que se instale y que los ángulos máximos que pueda girar se lo permitan. También se caracteriza por ser el sistema de seguimiento más costoso, ya que al requerir más partes móviles que en los otros casos, implica mayor riesgo en que algo falle [8]. En el caso de que en la mayoría del tiempo haya radiación difusa, sería más costo eficiente tener seguidores de un solo eje, dado que son menos costos, tienen menos partes móviles y dado que la radiación proviene en todas direcciones, no es de suma importancia que queden apuntando directo al Sol.

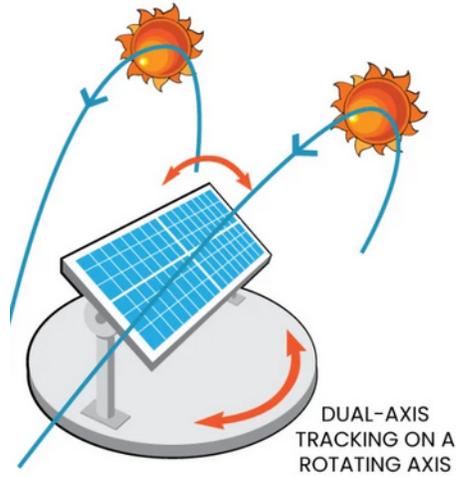


Figura 2.19: Seguidor solar de dos ejes [8].

## 2.5. Descripción de la cocina solar seleccionada y su modelo computacional

La cocina solar seleccionada es la cocina con espejo inferior, vista en 2.14.

Se selecciona este modelo de cocina solar para llevar a cabo los objetivos planteados en la introducción. En las siguientes secciones se simulará el modelo computacional de esta cocina, para luego validar la simulación de este modelo, una vez validado el modelo se resuelven los casos de estudio que se plantean en el trabajo, y por último, se incluirá en la configuración de la plataforma con seguimiento solar para determinar su desempeño en conjunto.

En la figura 2.20 se ve una comparación entre la cocina solar real con la cocina solar modelada en COMSOL.

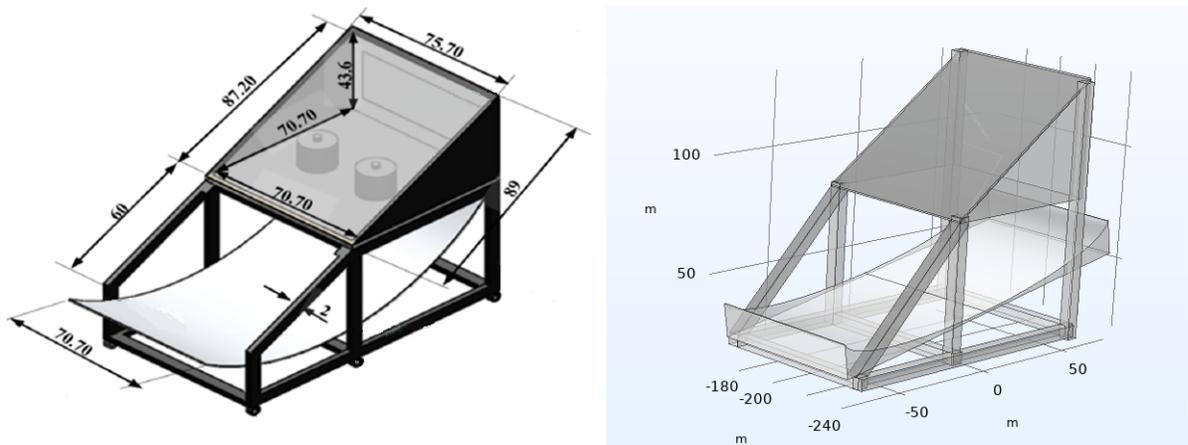


Figura 2.20: Medidas reales y modelo usado en simulaciones.

# Capítulo 3

## Propuesta metodológica

### 3.1. Descripción general

La forma de realizar esta experiencia consta de dos partes principales. Primero se desarrolla la parte en la que se calculan las transferencias de calor a partir de los rayos solares directos y reflejados, mediante el uso de análisis térmico y óptico. Luego se realiza un estudio con seguidor solar para lograr un menor tiempo al momento de cocinar los alimentos o del mismo modo, para aumentar las horas en que se puede ocupar la cocina solar.

Los modelos y gráficos obtenidos que se presentarán en la siguiente sección fueron simulados utilizando la herramienta de análisis COMSOL. Este es un programa computacional en el cual se diseña la cocina solar, se incorporan las condiciones en las que se encuentra (temperatura ambiente, radiación, materiales, etc.) y a partir de esto entrega los comportamientos esperados respecto al estudio que se realice.

En el caso particular de este estudio, se utilizarán las herramientas de *óptica geométrica* para el trazado de rayos solares según la fecha y zona seleccionada, y también la herramienta de *transferencia de energía de superficie a superficie* para la simulación de transferencia de calor entre las paredes de la cocina solar hacia el aire interior y a la comida.

En la figura 3.1 se puede observar el diagrama en el cual se explican los pasos y etapas a seguir en este trabajo.

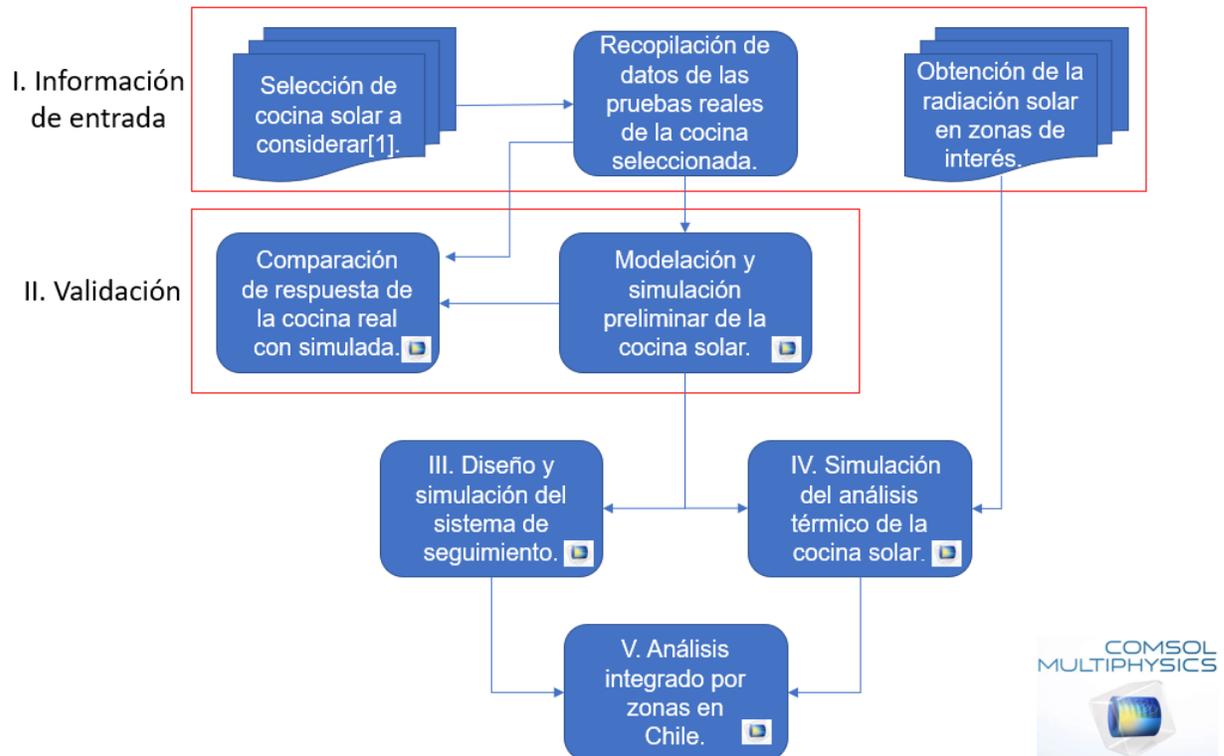


Figura 3.1: Diagrama propuesta metodológica.

## 3.2. Información de entrada

En esta sección se presentará toda la información que es requerida para hacer los análisis posteriores en el capítulo de Caso de Aplicación.

### 3.2.1. Radiación solar en zonas de interés

A partir de la información obtenida del Explorador Solar, se recolectan datos de radiación solar por mes a las 12:00 pm, con lo que luego se realiza un promedio y se define una radiación solar para cada mes del año. En seguida, se incorporan esas radiaciones mensuales al modelo del reflector solar para definir la máxima intensidad de radiación producida en el punto focal del espejo a lo largo del año.

En paralelo, se recopilan datos de la probabilidad de nubosidad, que entrega la probabilidad de que haya nubes en un periodo de tiempo determinado en la zona estudiada. Este dato es importante al momento de usar cocinas solares, ya que estas cocinas funcionan a partir de radiación solar directa, y cuando hay nubes, la mayor parte de radiación solar que se produce es radiación difusa, con la que no se podría cocinar comida.

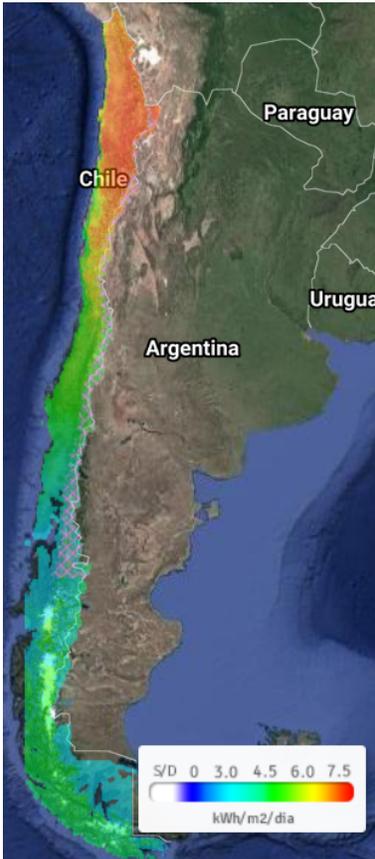


Figura 3.2: Radiación solar en Chile.

Para lograr un estudio que incorpore todas las variables relevantes a lo largo de Chile, se recopilan los datos mencionados anteriormente a partir de tres zonas del territorio nacional. En la zona norte se recopilan datos de Calama, en la zona centro de Santiago y en la zona sur de Punta Arenas.

Como se puede apreciar en la figura 3.2 se distinguen tres principales zonas dentro de Chile según la cantidad de radiación recibida a partir del Sol, por esta razón se escogieron las tres zonas mencionadas en el párrafo anterior.

La zona norte que tiene alrededor de  $7,5 \text{ kWh/m}^2/\text{día}$ , lo cual es una gran cantidad de energía solar para ser aprovechada, ya sea por tecnologías fotovoltaicas, o bien por tecnologías de concentración solar. Luego se distingue la zona central, representada por la zona amarilla y verde en el mapa, esta zona recibe entre  $4,5$  y  $6 \text{ kWh/m}^2/\text{día}$  lo que se ubica en la parte intermedia, esto implica que si bien se puede realizar proyectos con tecnología que aproveche la radiación solar, los resultados no serán óptimos como en la zona norte. Por último se tiene la zona sur, esta está representada mayoritariamente por las zonas celeste y verde, lo que indica que su rango de energía solar varía entre los  $3$  y  $4,5 \text{ kWh/m}^2/\text{día}$ , haciendo más difícil aprovechar el recurso solar en esta zona

que en la zona norte y centro del país.

Cabe destacar que los datos mensuales de radiación del Explorador Solar son promedios entre los datos obtenidos diariamente, por lo que debería haber una variabilidad mayor en los gráficos que se muestren. No se disponen de los datos diarios, por lo que no se agregará la variabilidad en cada punto de radiación solar directa ni de temperatura ambiental en los gráficos.

La información obtenida a partir del Explorador Solar será ingresada a COMSOL, que junto al diseño del espejo de la cocina solar [2] y [3], darán un estimado de la radiación enfocada por el espejo y se obtendrán los datos de amplificación de radiación solar en su foco, según el mes del año y la zona de Chile.

### 3.2.2. Selección de cocina solar a considerar

A partir del paper [1] se selecciona la cocina solar con reflector inferior. Se escoge este diseño porque, a partir de los datos recolectados del mismo paper, esta cocina tiene un buen desempeño en cuanto a los tiempos en que calienta la comida, tiene componentes para su construcción fáciles de encontrar en cualquier ferretería o lugar especializado, y tiene un buen precio para la cantidad de energía que produce.

Para hacer el modelo en COMSOL es necesario tener las mediciones de la cocina [1], tanto del compartimiento donde se calientan las ollas como del espejo, se pueden apreciar dichas dimensiones en la figura 3.3.

Se utilizan en la simulación los mismos materiales que se usaron en el experimento real para aislar las paredes, por lo que se usa un vidrio en la parte superior para producir efecto invernadero dentro de la cocina, en las paredes internas se coloca un material negro para que absorba el calor del Sol y este al cambiar de longitud de onda quede confinado dentro de la cocina, el espejo inferior es diseñado en COMSOL lo más parecido posible al modelo real, ya que una pequeña diferencia en el ángulo de curvatura puede causar errores significativos en los datos obtenidos. En la parte inferior del compartimiento de la cocina hay una placa de cobre pintada negra, esta es la superficie que recibe la intensidad lumínica concentrada y se calienta para transmitir el calor hacia el interior de la cocina, también posee doble aislación hecha con vidrios transparentes.

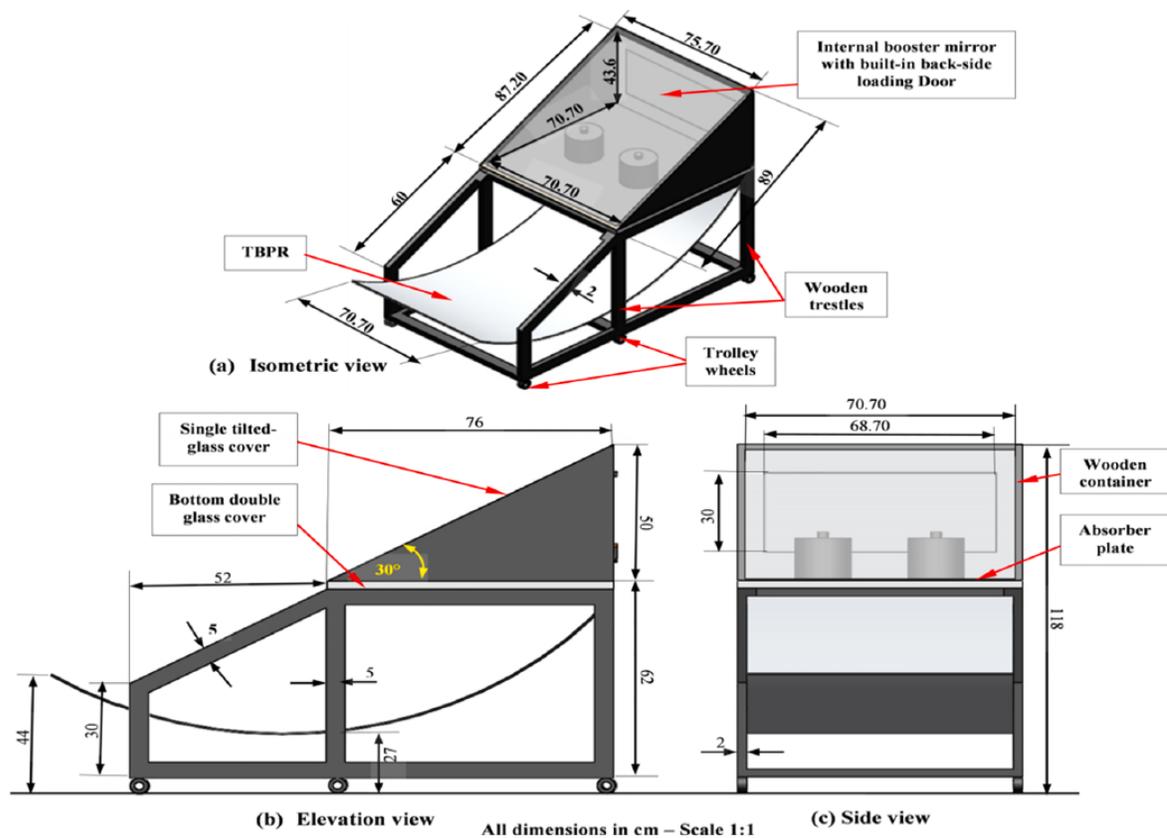


Figura 3.3: Dimensiones cocina solar [1].

### 3.3. Validación de la cocina simulada

Para validar el modelo computacional de esta cocina solar, se recopilan datos de una de las pruebas que se le realizan, específicamente la de cocción de comida en ollas. A partir de esta información, se realizan cambios de diseño al modelo computacional para que se parezca lo más posible a los datos experimentales, siempre tomando en cuenta los valores de radiación

solar y temperatura ambiente presentes en el experimento real.

Mientras los datos arrojados por COMSOL no se parezcan a los datos reales, se realizarán ajustes al diseño, pero solo a las variables que no están fijas, iterando hasta que los valores sean lo más parecido a datos reales.

La prueba real consiste en apreciar la diferencia entre el desempeño de la cocina con espejo inferior, y sin espejo inferior. Cada prueba se hace en un día distinto con condiciones de radiación y temperatura muy similares, ambas inician a las 10:22 am. Es con esta base y sus datos, que se realizarán los modelamientos para validar la cocina solar simulada.

Los datos reales recopilados de [1] están en anexos A.1, A.2, A.3, A.4 y A.5.

### **3.4. Simulación de análisis térmico de la cocina solar**

Para llevar a cabo este estudio, se deben realizar dos pruebas. Primero, la comparación del comportamiento de la cocina con reflector inferior vs. sin reflector. En segundo lugar, la comparación entre la cocina con seguidor y sin seguidor.

#### **3.4.1. Cocina con espejo vs. sin espejo**

Para hacer esta simulación es necesario quitar la radiación producida por el espejo inferior. Para poder realizar esta prueba en un periodo más largo de tiempo que en el paper [1] se utilizaran los datos obtenidos a partir del Explorador Solar como datos de entrada, ya que en las pruebas con comida del paper [1] duraban hasta un máximo de 2 horas.

Como los datos se obtienen a partir del Explorador Solar, la simulación se realiza en el norte de Chile, específicamente las mismas coordenadas obtenidas anteriormente en Calama y en el mes de enero. Luego se utilizan estos datos para hacer las simulaciones en COMSOL, con lo que se obtendrán los resultados.

Para el caso con espejo, se hace llegar un flujo concentrado de radiación solar a la pared inferior de la cocina, en cambio, para el caso sin espejo esta superficie le llega solo sombra. El estudio se realiza desde 8am a 18pm dado que solo entre esas horas llega radiación solar directa en enero. Ambas pruebas se realizan con seguimiento solar.

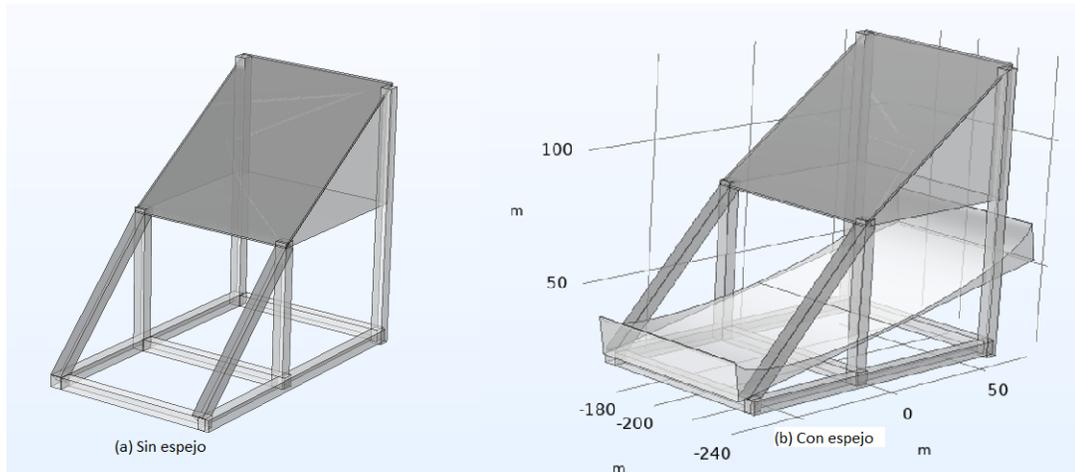


Figura 3.4: Modelo sin espejo vs. con espejo.

### 3.4.2. Cocina con tracker vs. sin tracker

En esta sección se analiza el efecto que tiene el sistema de tracking en la cocina solar. La forma de realizar la experiencia es situar a la cocina sin tracker en un ángulo específico para que le llegue directa la luz del mediodía, y como a esa hora la radiación está en su mayor punto, va a ser el mejor escenario que pueda tener un sistema sin tracker. De ese modo, se compara la mejor situación sin tracker con el sistema con tracker y se determina la diferencia entre ellos.

## 3.5. Diseño y simulación de sistema de seguimiento

### 3.5.1. Componentes y armado de seguidor solar

Para determinar los componentes que se deben usar en la plataforma, primero hay que hacer un análisis de qué tan duro y pesado se quiere que sea. Si es muy pesado, se va a requerir de un motor de mayor potencia para hacer seguimiento, y, por lo tanto, deja de ser eficiente usar un seguidor si el consumo del motor supera a la energía aprovechada por hacer seguimiento. Si es muy liviano, el material podría deformarse y no soportaría a las personas que carguen las cocinas solares. Es por esto que es importante tener en cuenta las propiedades y pesos que se manejarán sobre la plataforma para que no ocurra un accidente.

En cuanto al armado, las piezas calzan unas sobre otras para que la estructura quede firme, lo importante es que sea firme en el eje vertical, ya que la velocidad angular va a ser muy lenta para que sea un problema para sus componentes.

### 3.5.2. Simulación de seguimiento solar

Esta sección se realiza en COMSOL, ya que resuelve automáticamente la dirección del Sol según las coordenadas que se ingresen al programa. Es así como al hacer andar el estudio de transferencia de calor, se ven las partes frías donde apunta la sombra (ver imagen 4.12), ya que estas indican donde no se calientan, y al simular un estudio dinámico se determina en

cada hora la posición del Sol gracias a las sombras. Una vez hecho eso, se puede determinar las horas en las que llega radiación a cierta zona, con lo que luego se pueden determinar los ángulos hasta los que debe moverse la plataforma y así establecer el seguimiento solar.

Una vez se determinan los ángulos entre los que se mueve la plataforma, se puede establecer el sistema digital para que recorra solo entre esos ángulos, así logrando un ahorro de energía de ser necesario. Si la reserva de energía supera al gasto diario, entonces puede funcionar con el algoritmo original que da una vuelta completa en el día.

### **3.5.3. Cálculo de torque y energía de funcionamiento**

Para calcular el torque que se requiere para hacer girar la plataforma, primero se debe determinar el peso que tendrá la plataforma giratoria, luego se puede hacer un análisis de inercia, con lo cual se puede resolver el torque de la plataforma sin roce. Una vez obtenido este torque, se calcula el roce de las ruedas y luego la ecuación queda con los torques de las ruedas igual al torque que ejerce el motor. La aceleración angular se toma en cuenta solo al inicio del movimiento en un tiempo muy reducido, haciendo así que la velocidad angular se pueda considerar constante durante la rotación de la plataforma.

Finalmente, se propone utilizar un motor de portón con el cual se fijan ciertas características que son necesarias para calcular cuánta energía se consume en el movimiento, y cuál será la frecuencia de rotación de la plataforma durante el día.

## **3.6. Análisis integrado por zona**

### **3.6.1. Zona norte**

En la zona norte se descargan los datos del Explorador Solar para el mes de enero y otro de junio en la ciudad de Calama. De esta forma quedan determinados el mes que debería ser el mejor mes de radiación solar, y luego el que debería ser el peor mes, ya que el Sol está más bajo en el horizonte. De este modo, el comportamiento de los demás meses estarán entre las dos curvas que se generan en el gráfico.

COMSOL se utilizó al igual que en las pruebas anteriores, solo cambiando la temperatura ambiente y la radiación solar, luego se interpolan los puntos discretos de temperatura y radiación, y así se puede utilizar como función de entrada para el cálculo de los gráficos.

### **3.6.2. Zona centro**

Aquí se obtienen los datos de Santiago del Explorador Solar, también para los meses de enero y junio en la ciudad de Santiago. El procedimiento es el mismo que en la zona norte, solo que con los datos de entrada de Santiago.

### **3.6.3. Zona sur**

Por último, se realiza el estudio en la zona sur. Los datos de la ciudad de Punta Arenas son obtenidos del Explorador Solar. Aquí el procedimiento es el mismo. Primero se traspasan los

datos a COMSOL, luego se interpolan los datos discretos para hacerlos continuos, y luego se usa como dato de entrada para que el programa realice la simulación. Los meses en los que se hizo la simulación fue en enero y junio al igual que con las otras dos ciudades.

### **3.7. Implementación**

La implementación se hizo utilizando el software COMSOL, para hacer una simulación se hacen 3 pasos. Primero se importan los datos que se quieran usar de entrada para localizarlos en una función interpolada, se le asigna un nombre, código, una unidad para el eje X, y el eje Y. Luego se realiza la construcción del modelo geométrico, y se establecen los materiales, resistencias, propiedades según el estudio que se esté realizando. Por último, se corre el tipo de estudio que se desee y así se logran obtener los resultados de la simulación.

Las simulaciones se llevaron a cabo en un notebook con procesador i7 de novena generación, tarjeta gráfica nvidia 1660Ti y con 16 gb de ram.

# Capítulo 4

## Aplicación de casos

### 4.1. Descripción general

La cocina solar que se ha usado durante este trabajo ha demostrado tener un muy buen desempeño cuando se trata de su capacidad de enfocar la energía solar en la cocina, ya que el tiempo que demora en hervir agua es igual de rápida que las cocinas solares de mayor calidad. En seguida se demostrará esta aseveración con el análisis del trabajo realizado.

En esta sección se verá la radiación que se dispone en las distintas zonas escogidas de Chile, luego se presenta la forma en que se utiliza el software COMSOL para hacer los estudios de rayos solares y transferencia de calor, en seguida se valida el modelo de la cocina solar, también se presenta las diferencias entre la cocina con seguidor y sin seguidor, con espejo reflector y sin espejo, se propone la construcción de la plataforma con seguidor solar en conjunto con su funcionamiento, y por último, se realiza el análisis por zona en Chile.

### 4.2. Información de entrada

En seguida se analizarán los estudios correspondientes a la información de entrada del trabajo, la cual es la base del proyecto.

#### 4.2.1. Radiación por zona

##### 4.2.1.1. Zona norte

Para el caso de la zona norte de Chile se descargaron los datos, obtenidos a partir del Explorador Solar, de la ciudad de Calama. Una vez hecho esto se seleccionan los datos de radiación solar, para determinar la radiación de entrada en la cocina solar para los estudios que se verán más adelante, el viento para determinar el coeficiente de transferencia de calor por convección en las paredes de la cocina y, por último, la nubosidad para determinar la cantidad de tiempo en la que la cocina solar dispone de radiación solar directa.

Como se puede ver en la figura 4.1, la zona norte posee una radiación solar directa prácticamente constante durante todo el año, lo que permite un buen aprovechamiento del recurso solar en la mayoría del norte chileno. Además de ser constante, es una gran cantidad de radiación, dado que esta varía entre los 900 y 1100 [W/m<sup>2</sup>], más que suficiente para cocinar comida durante todo el año. También se puede observar en el gráfico que la nubosidad de la

zona es muy baja, ya que a lo largo del año no sobrepasa el 5%, lo que significa que de los 365 días del año, habrá radiación solar directa 347 días. Condición óptima para proyectos que aprovechen la energía solar en la zona.

Por último, se puede apreciar en la figura 4.1 la concentración solar por el espejo, que es la intensidad máxima recibida en el punto focal de dicho espejo, tomando en cuenta la sombra que hay en este espejo. Esta información ayuda a entender cuánta es la amplificación de energía solar que se produce en un punto gracias al espejo reflector. Luego esta intensidad es enfocada en la placa de cobre, la cual se calienta y empieza a transmitir su calor hacia la cocina y luego hacia la comida, alcanzando temperaturas suficientemente altas para su cocción.

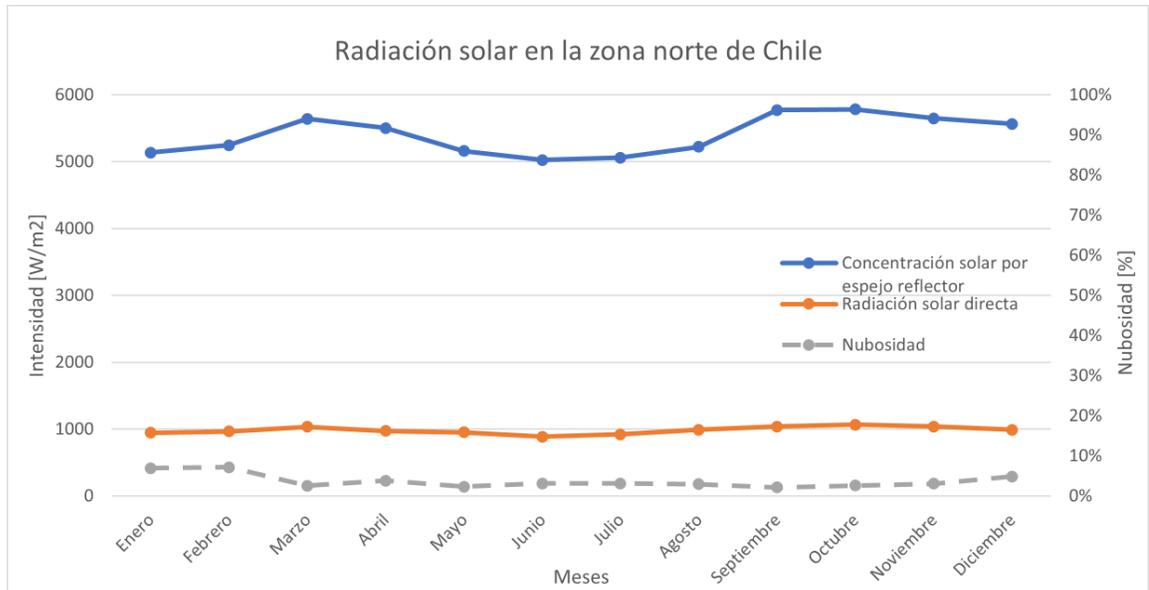


Figura 4.1: Radiación solar zona norte.

Esta zona es ideal para las cocinas solares, ya que cuenta con muchas ventajas ambientales para la cocción de alimentos con radiación solar. La combinación entre radiación de gran intensidad y nubosidad baja permite que la cocina solar concentre una gran cantidad de rayos solares en el punto focal, así permitiendo alcanzar temperaturas altas en la comida, lo que a su vez hace que se pueda cocinar en menor tiempo o en mayor cantidad. La nubosidad escasa permite que la cantidad de tiempo en el que se puede utilizar la cocina aumente, haciendo aún más factible su implementación en la zona norte de Chile.

#### 4.2.1.2. Zona centro

Para el caso de la zona centro de Chile se descargaron los datos, obtenidos desde el Explorador Solar, de la ciudad de Santiago. A partir de estos datos se seleccionan los de radiación solar, viento y nubosidad.

Se puede apreciar en el gráfico de la figura 4.2 que la radiación solar en la zona centro es más variable que lo visto en la zona norte, ya que depende en gran medida de la época del año en que se estén tomando las medidas. Por ejemplo, si tomamos las medidas en época de verano, la radiación y nubosidad son óptimas para la utilización de las cocinas solares, ya

que hay gran radiación solar directa que bordea los 800 [W/m<sup>2</sup>] y a su vez la nubosidad no sobrepasa el 8% lo que implica que habrá mucho tiempo de exposición disponible. Ahora, si observamos la temporada de invierno del gráfico, se podrá observar que la radiación baja bastante, alcanzando solo los 400 [W/m<sup>2</sup>], la mitad de la radiación recibida en los meses de verano, mientras que la nubosidad aumenta considerablemente, alcanzando la probabilidad del 20%.

Se puede distinguir que la concentración solar está ligada de forma proporcional a la radiación solar. De verano a invierno la radiación solar baja a la mitad, y del mismo modo lo hace la intensidad del rayo concentrado de la cocina solar, con lo que se hace muy difícil realizar la cocción de alimentos. La concentración solar en verano es suficiente para cocinar en unas pocas horas, sin embargo, en invierno tomará muchas horas realizar la misma acción.

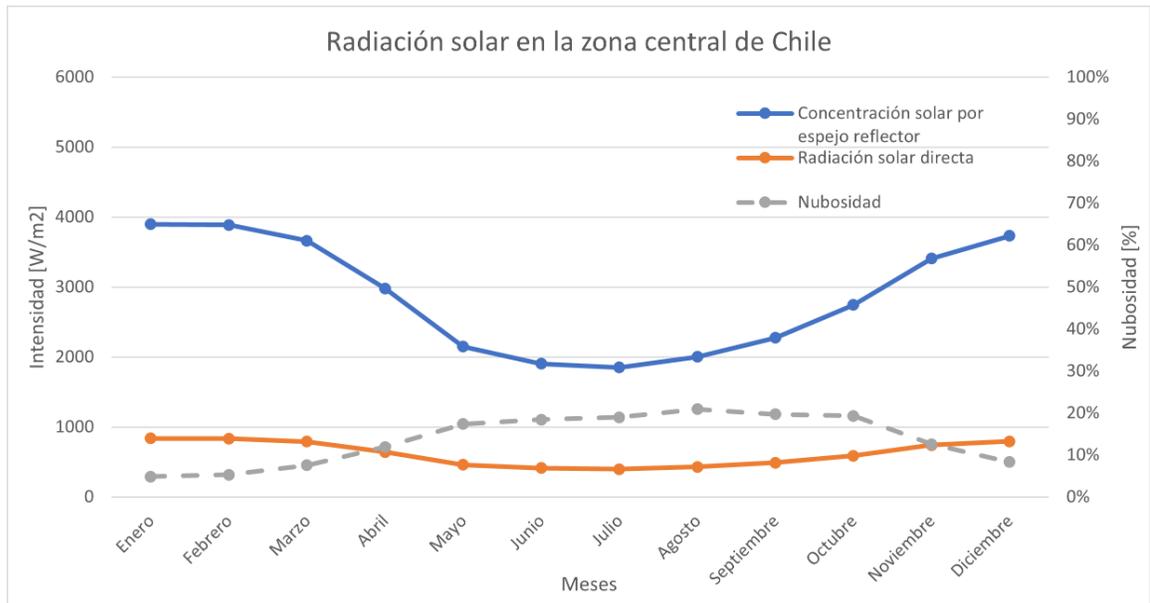


Figura 4.2: Radiación solar zona centro.

Se puede desprender a partir de lo mencionado anteriormente y del gráfico 4.2 que en la zona central se puede aprovechar la radiación solar para la cocción de alimentos en cocinas solares, pero se debe tomar en consideración que solo tendrán buen desempeño en los meses de verano dada su baja nubosidad y gran radiación solar, ya que por la alta probabilidad de nubosidad y baja radiación solar directa que hay en los meses de invierno, se hace muy difícil y lento cocinar comida en una cocina solar, como se verá en las secciones siguientes.

#### 4.2.1.3. Zona sur

Como se puede ver, en el gráfico de la figura 4.3 los ejes fueron dejados en el mismo valor de los gráficos anteriores, esto es con la finalidad de que se pueda apreciar a simple vista la diferencia que hay entre las zonas estudiadas de Chile.

Para el análisis de la zona sur de Chile se descargaron los datos de la ciudad de Punta Arenas a partir de la página web del Explorador Solar. En esta descarga hay una gran cantidad de datos, pero para este estudio es necesaria solo la información de radiación solar directa, viento y probabilidad de nubosidad.

Se aprecia a partir de la figura 4.3 que la radiación base que hay en esta zona es muy baja durante todo el año. Esto se debe a que al estar en una zona muy alejada del ecuador, los rayos solares que llegan a esta zona son dispersados por la capa más gruesa que deben recorrer de atmósfera. Es así como la radiación solar directa no sobrepasa los 450 [W/m<sup>2</sup>] durante todo el año. Por otro lado, se tiene que la nubosidad de la zona es muy frecuente, llegando hasta el 40% en los meses de verano y disminuyendo hasta el 10% en los meses de invierno. Si se comparan estos valores de nubosidad con las otras zonas de Chile, se aprecia que la probabilidad de nubosidad en esta zona es mucho mayor a cualquier zona, lo que dificulta la posibilidad de hacer proyectos de cocinas solares en este lugar.

La concentración solar será baja, dado que la radiación solar directa del extremo sur de Chile es baja a lo largo del año por las razones antes mencionadas. Al tenerse una baja concentración implica que la transmisión de calor proveniente de esta será insuficiente para hacer hervir agua en un periodo relativamente corto de tiempo, aunque esté todo el día bajo la radiación solar directa de esta región. De aquí se desprende que no hay un buen desempeño general de la cocina solar en cuanto a intensidad solar concentrada.

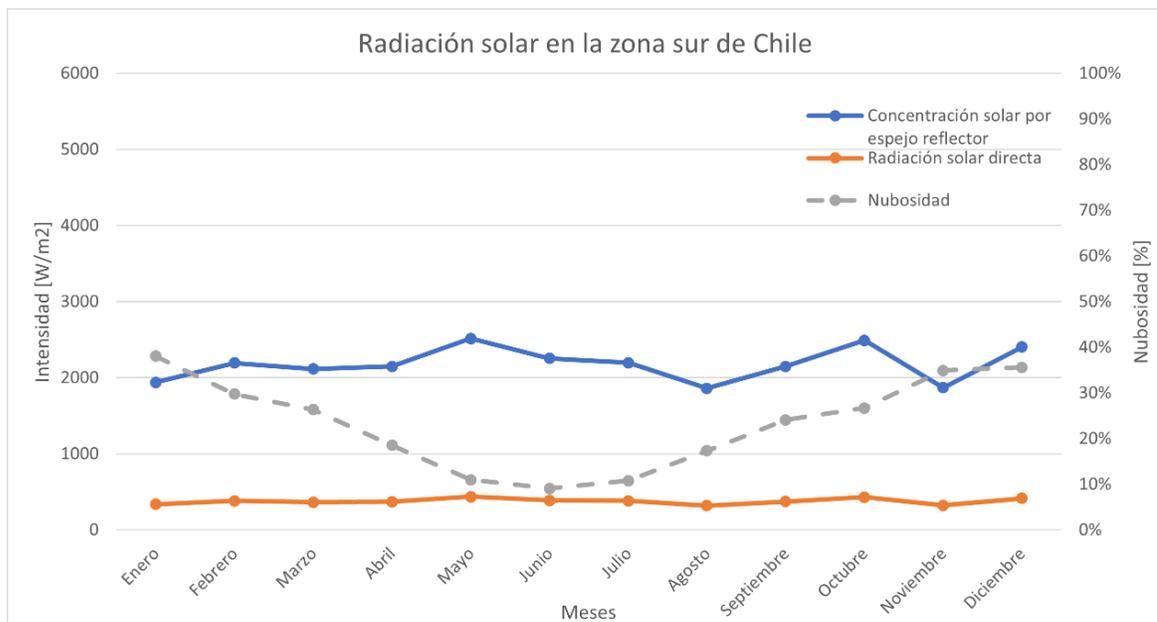


Figura 4.3: Radiación solar zona sur.

Se puede entender que en la zona sur de Chile hay malas condiciones en cuanto a radiación solar directa y nubosidad, luego se hace difícil que se pueda implementar una tecnología como la de las cocinas solares en esta zona, ya que de instalarse podrían servir solo para calentar comida, ya que para cocinar se demoraría varias horas. El único mes en el que hay mejores condiciones climáticas para la utilización de la cocina es en mayo, ya que en este mes hay poca probabilidad de que haya nubosidad y la radiación solar es intermedia, por lo que podría utilizarse este tipo de cocina en ese mes para la cocción de alimentos.

## 4.2.2. Utilización de COMSOL para análisis de radiación solar

Para determinar la cantidad de radiación solar que se verá concentrada en una plataforma de la cocina solar se deben ingresar los datos requeridos por el programa para su funcionamiento. En la figura 4.4 se pueden ver los pasos a seguir para comprender el proceso del software.

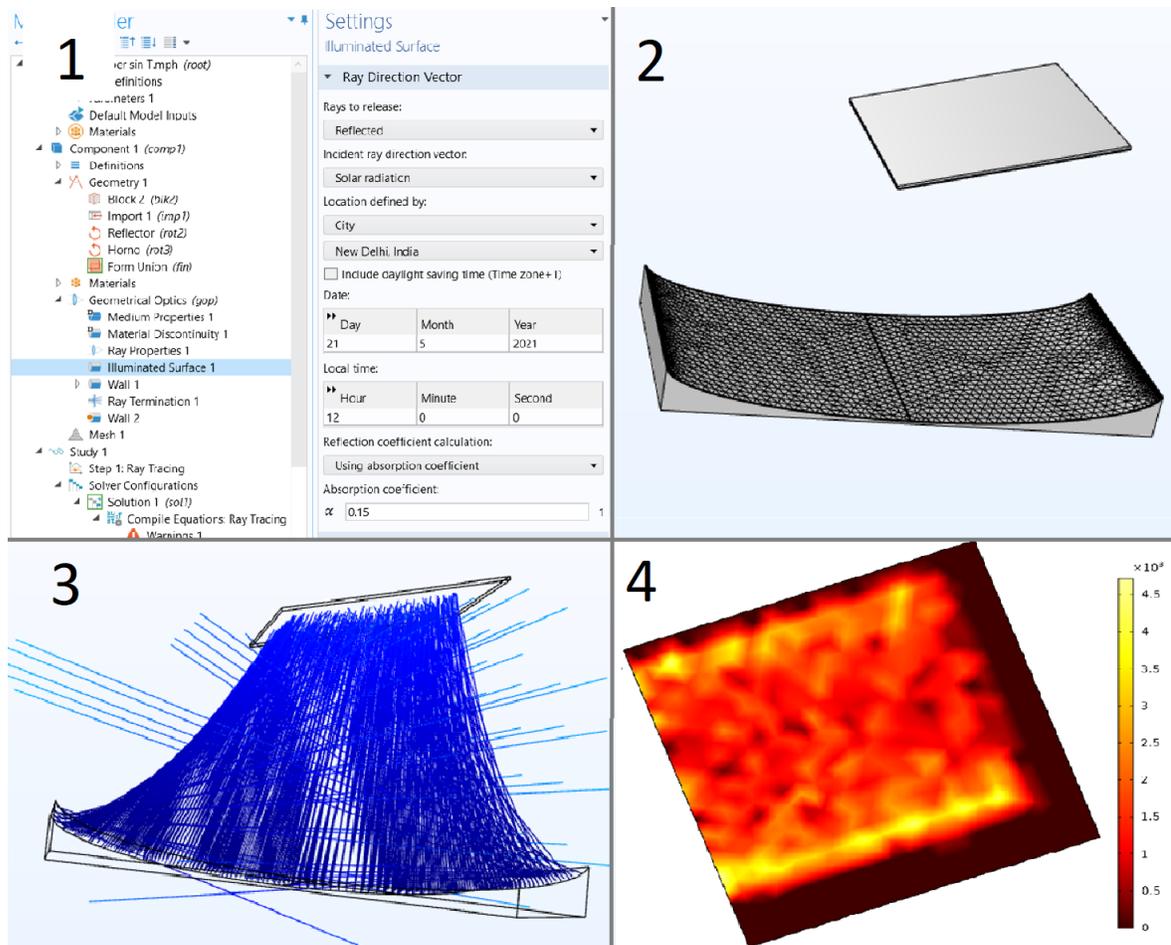


Figura 4.4: Utilización de COMSOL para determinar concentración solar.

En la parte 1 de la figura 4.4 es donde se ingresan los datos de entrada que son necesarios para empezar a hacer las simulaciones, se ingresan datos de coordenadas o posición de una ciudad, el coeficiente de absorción del espejo, el tiempo de simulación, la intensidad de la radiación solar y la finura del enmallado. Estos datos de entrada son los más importantes para este modelo.

En la parte 2 se aprecia el enmallado producido por las variables anteriormente ingresadas, también se ve que el espejo reflector tiene un ángulo con respecto al plano horizontal, esto es para que el foco del espejo quede dentro de la superficie superior, esta superficie es la superficie inferior del compartimiento de la cocina.

En la parte 3 se ve el resultado de la simulación, los rayos azules representan los rayos reflejados del Sol, que como se puede ver caen todos dentro de la plataforma superior, proceso fundamental para los resultados que se verán en las siguientes secciones.

Por último, otro resultado de la simulación se ve en la imagen número 4, que es la cantidad de radiación solar que llega a la plataforma luego de ser enfocado. Se aprecia que en las partes con mayor radiación alcanza los 4500 [W/m<sup>2</sup>].

### **4.3. Validación de la cocina solar simulada**

La base de todo este trabajo de investigación es en función de esta sección. Esto se debe a que los resultados que se obtienen en adelante son a partir del modelo más cercano que se pudo establecer con las condiciones reales de funcionamiento, que se obtuvieron a partir de las muestras tomadas a partir del paper [1].

#### **4.3.1. Comparación de muestras reales con simuladas**

La prueba real realizada con el tipo de cocina escogida fue hecha en India, por lo tanto, se hizo la simulación con coordenadas de ese país, específicamente de Nueva Delhi. Una vez situado en esa zona se ingresan al programa las condiciones ambientales que se tuvieron al hacer la prueba real.

Se obtienen datos reales de radiación solar para el experimento sin espejo inferior, las cuales varían entre los 850 y 920 [W/m<sup>2</sup>]. Luego estos son datos son ingresados al programa como datos de entrada. También se obtienen datos reales de temperatura ambiente durante el experimento, estos varían desde los 33°C a 36°C. Estos datos se pueden ver en la figura 4.5 representado por los rombos amarillos para la radiación solar, y como triángulos azules para la temperatura ambiente.

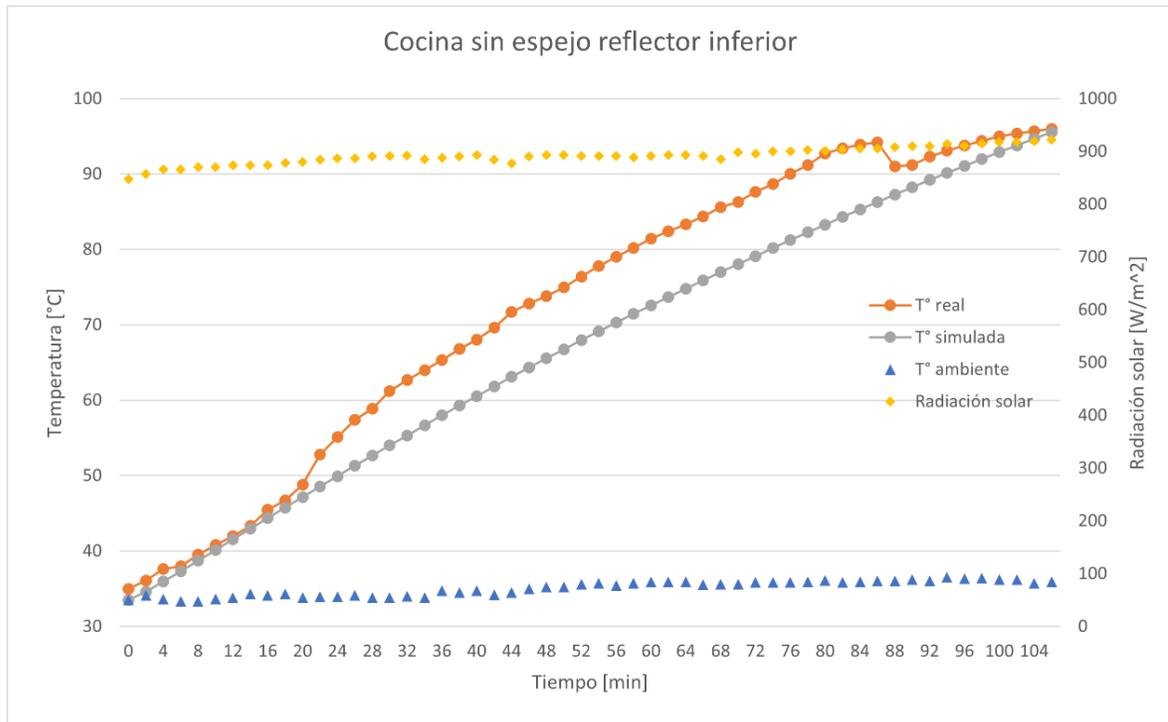


Figura 4.5: Validación cocina simulada sin espejo inferior.

La curva naranja es la realizada con datos reales, mientras que la curva gris es la realizada por la simulación. Se puede apreciar en estas que empieza el modelo de forma adecuada hasta el minuto 20, donde la temperatura real sube más que la simulada por el programa. La causa probable de esto es que el viento que haya habido en la zona disminuyera, por lo que la disipación de calor disminuyó. Al no tener los datos reales del viento se utilizó un coeficiente de transferencia de calor convectiva basándose en los vientos promedios que hay en la zona.

A pesar de lo mencionado anteriormente, las líneas parecen seguir una función parecida, lo que lleva a concluir que el comportamiento de la cocina simulada puede tomarse como un límite inferior del comportamiento real de la cocina sin espejo inferior.

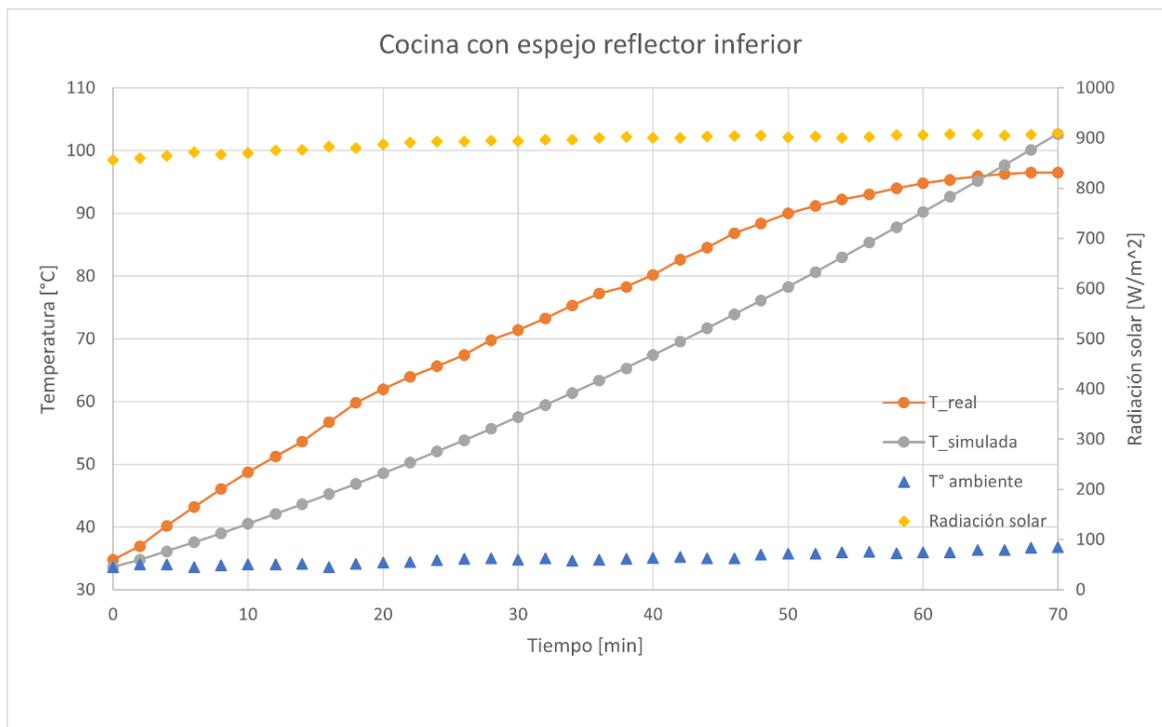


Figura 4.6: Validación cocina simulada con espejo inferior.

Ahora para verificar el funcionamiento de la simulación se realiza el estudio mezclando dos físicas en COMSOL, primero se calcula la energía concentrada por el espejo inferior y luego se hace el estudio de transferencia de calor con la radiación solar directa sobre la cocina y con la reflejada por el espejo inferior.

En el gráfico de la figura 4.6 las funciones de temperatura de la comida se distancian aún más que en el caso sin espejo. Esto puede deberse al error inducido por los cálculos de radiación en la placa inferior de la cocina, ya que no se puede hacer un estudio temporal para un trazado de rayos, por lo que para cada dato de radiación real se hizo un modelo por separado, para después ingresar la intensidad promedio en la pared receptora de radiación solar enfocada. Este promedio desvía la cantidad de calor real que se recibe en la placa inferior de la cocina, lo que puede haber afectado la precisión de la simulación.

Otro punto relevante es que las pruebas reales se realizan con agua, la que tiende a alcanzar los 100°C, sin embargo, en el programa no se puede establecer ese límite usando solo la física de transferencia de calor, por lo que no fue posible integrarlo al modelo. De haberse integrado la curva en el minuto 60 habría empezado a decaer al igual que en la curva de temperatura real.

De aquí en adelante, los estudios de transferencia de calor son realizados a partir de este mismo modelo, solo cambiando las condiciones ambientales de las zonas en las que se hacen las simulaciones. Para ambos casos la simulación representará un límite inferior al comportamiento real, por como se puede ver en las figuras 4.5 y 4.6.

### 4.3.2. Manejo con COMSOL para validación

Las etapas a seguir para validar el modelo simulado constan de dos partes, dada la forma en que funciona COMSOL. Primero se realiza el estudio de óptica geométrica, en el cual se siguen las direcciones de los rayos de luz provenientes del Sol, el problema con este estudio es que no se puede incorporar la variación de dirección de la luz proveniente del Sol, por lo que se deben hacer estudios separados para cada intensidad de radiación solar. En segundo lugar, se hace el estudio de transferencia de calor en el cual se utiliza la radiación que llega desde el Sol a la superficie de la cocina, tanto directamente como por el reflejo en el espejo inferior.

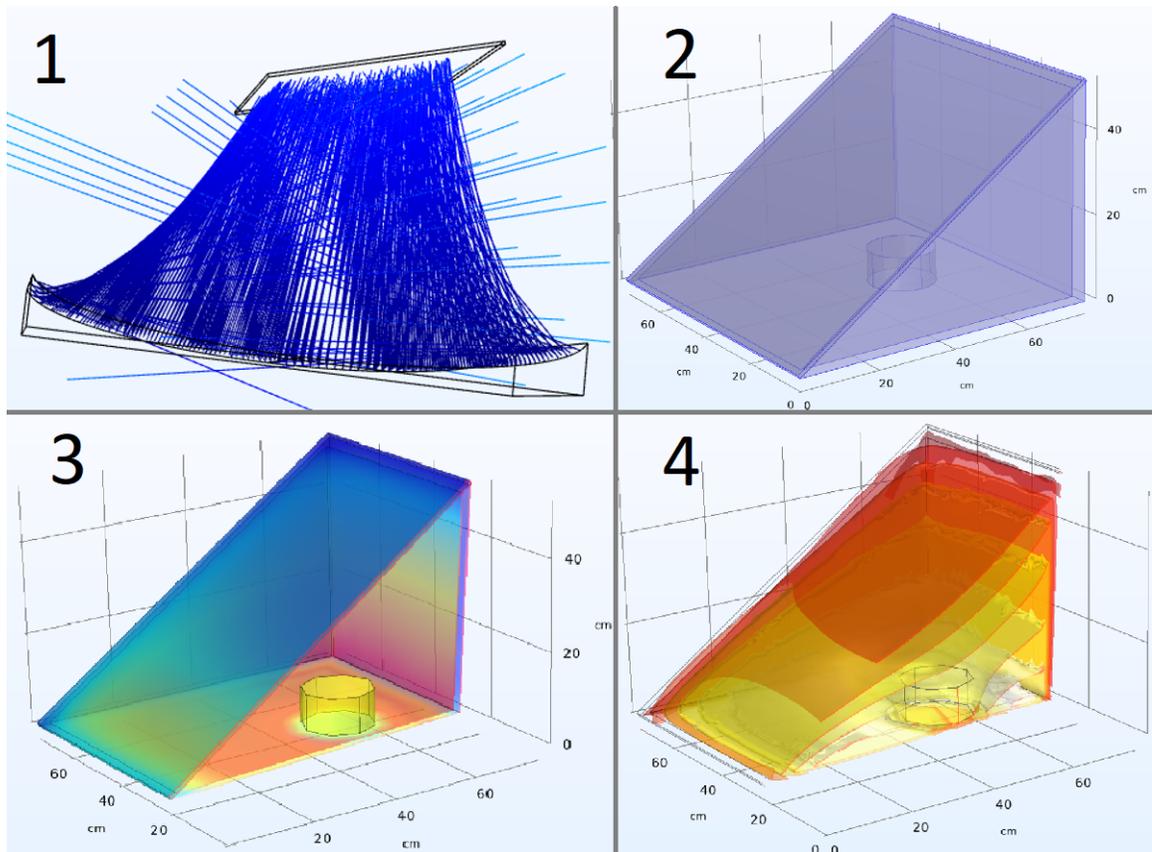


Figura 4.7: Utilización de COMSOL para validar modelo.

En la figura 4.7 se muestran los pasos y componentes que se utilizan en el estudio de validación.

En la imagen 1 de la figura 4.7 se aprecia el primer paso, que es tomar en cuenta la cantidad de radiación que incide en la placa inferior de la cocina, luego esta radiación es utilizada como información de entrada para el estudio térmico.

En la imagen 2 se presenta el compartimiento donde se coloca la olla con comida, por simplicidad la olla se llena con agua hasta su tope. La imagen 2 a su vez muestra el calor transmitido por las paredes y por la olla, al igual que en la imagen 4, solo que en esta última se ven las curvas de una misma temperatura por nivel, con lo que se puede entender cómo se distribuye

el calor dentro de la cocina, cabe mencionar que el nivel amarillo tiene la mayor temperatura y esta decae hasta rojo.

## **4.4. Análisis térmico de la cocina solar**

En esta sección se utilizará el programa COMSOL para simular el comportamiento térmico de la cocina solar, desde sus paredes hasta la olla con agua en su interior.

En los casos siguientes de cocina con espejo, sin espejo, con tracker y sin tracker, se realizan las mediciones con datos obtenidos de la página web del Explorador Solar. Estos datos son de la zona norte de Chile, dadas las condiciones climáticas favorables para la implementación de cocinas solares. De este modo se obtendrán los datos más consistentes y replicables durante el año, dada la poca variabilidad climática en esta zona, ya sea desde el punto de vista de radiación solar o de la nubosidad presente en la zona a lo largo del año.

### **4.4.1. Cocina con espejo vs. sin espejo**

El estudio de cocina con espejo vs. sin espejo demuestra las diferencias en el tiempo de cocción de la comida, y la importancia que tiene este espejo en el proceso.

Los resultados que se obtendrán en la siguiente simulación se basan en las condiciones iniciales de la zona norte de Chile en el mes de enero. Se puede ver en la figura 4.8 que la radiación solar directa está representada por los rombos amarillos, mientras que la temperatura ambiente está representada por los triángulos grises. El tiempo de la simulación va desde las 8:00 am hasta las 18:00 pm, ya que estos son los horarios en los que hay radiación solar directa según los datos del Explorador Solar.

Se debe mencionar que para esta simulación en ambos casos se hizo seguimiento solar. Así, la única variable distinta será si tiene o no el espejo inferior. No se realiza el estudio sin seguidor y sin espejo, ya que la energía producida ya es baja únicamente sin espejo.

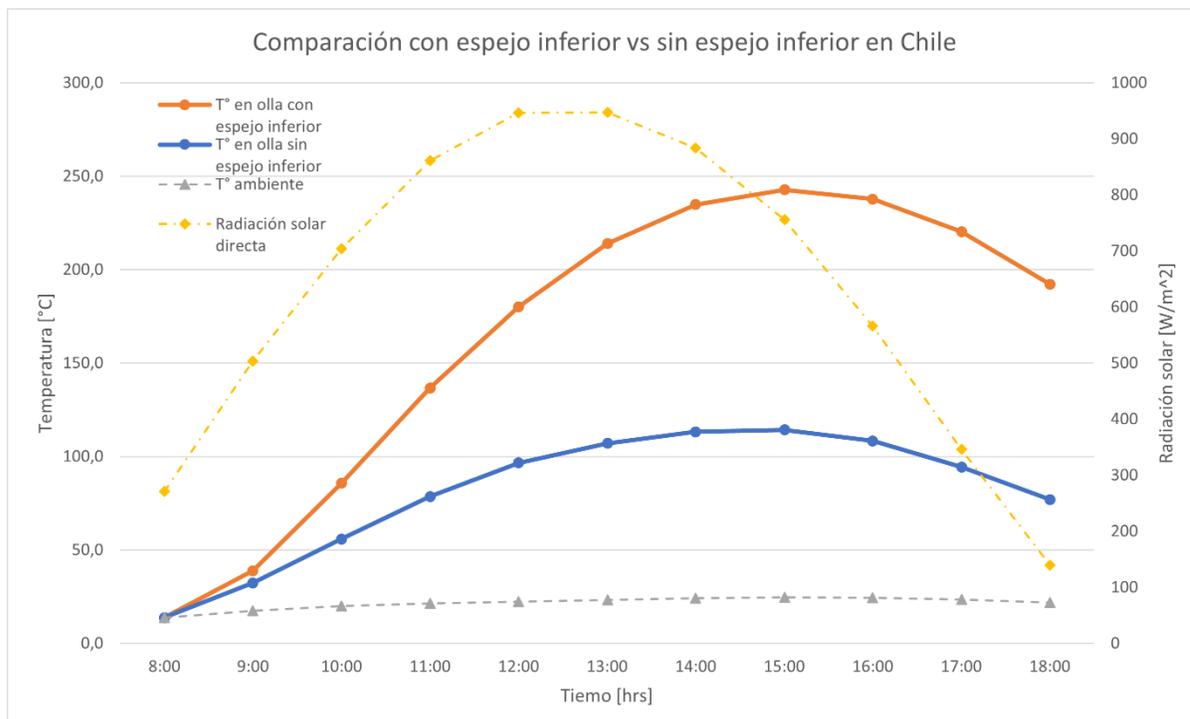


Figura 4.8: Comparación cocina solar con espejo vs. sin espejo.

Se puede apreciar que hay una gran diferencia entre la temperatura que alcanza la olla con espejo inferior y la temperatura en el caso sin espejo. En el caso con espejo se llegan a temperaturas de 250°C, esto se debe a que en el programa no está implementada la evaporación del agua, por lo que puede alcanzar esos valores. Por otro lado, tenemos al caso sin espejo inferior que no llega más allá de los 120°C.

Otro punto relevante es el tiempo que demora en llegar a los 100°C, ya que con esa temperatura se puede realizar la cocción de la mayoría de los alimentos. En el caso con espejo y colocando la cocina desde las 8 am, se demora un poco menos de 2,5 horas en llegar a los 100°C, mientras que en el caso sin espejo tarda aproximadamente 4 horas. Este tiempo es distinto al caso de validación porque la temperatura ambiente en India al momento de hacer las mediciones reales rondaban los 35°C, mientras que en el norte de Chile rondan los 20°C.

#### 4.4.2. Cocina con tracker vs. sin tracker

En esta sección se demostrará la utilidad de tener un sistema de seguimiento solar, ya que en cualquier tecnología que dependa del Sol es necesario que la energía solar provenga directamente hacia la superficie que absorbe o refleja la luz. En este caso se demostrará el desempeño producido por el seguidor solar en la cocina solar presentada anteriormente.

Las condiciones en que se llevan a cabo las simulaciones son las mismas que en el caso anterior, se tendrá la radiación solar directa del norte de Chile, la temperatura ambiente, y la dirección de los rayos del Sol de un día promedio de enero en Calama. También cabe mencionar que en ambos casos las cocinas solares tienen espejo inferior.

El sistema de seguimiento se realiza con ángulo inicial  $0^\circ$  a las 8:00 am, de modo que el ángulo inicial coincida con la hora inicial. Luego se gira la cocina solar, de modo que el Sol quede siempre de frente a esta hasta llegar a los  $140^\circ$ , que es el giro necesario para que a las 18:00 pm le llegue el Sol directo en esta zona del país.

Para el caso sin seguidor solar, se posicionó en  $70^\circ$  de giro siguiendo la misma razón del ángulo  $0^\circ$  del sistema con seguimiento. De este modo, a la hora de mayor radiación solar estarán llegando los rayos del Sol directamente a la cocina, quedando demostrado así que ni en el mejor de los casos el sistema sin seguidor solar funciona mejor.

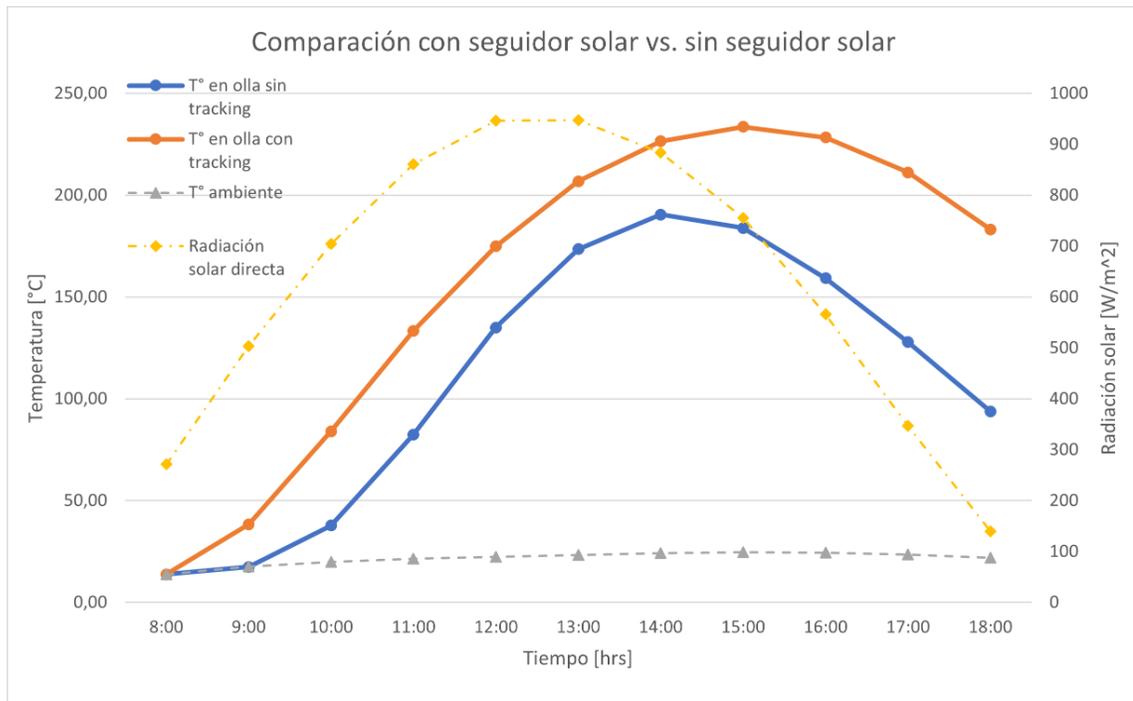


Figura 4.9: Comparación cocina solar con tracker vs. sin tracker.

Se puede apreciar, a partir de la figura 4.9, que la temperatura en el caso sin tracking se demora más en subir que en el caso con tracking, esto se debe a que al estar apuntando siempre hacia el Sol, el sistema con tracking aprovecha más la radiación a esas horas de la mañana y a pesar de que la radiación es baja a esa hora, aun así logra calentar la comida bastante más rápido que en el caso sin seguidor solar.

También se debe mencionar la variable más notoria al momento de ver el gráfico. La temperatura máxima que se produce en el caso con seguidor es más alta que en el caso sin seguidor, ya que presenta una diferencia entre los puntos máximos de temperatura de  $43^\circ\text{C}$ . Esto demuestra la relevancia e importancia que tiene el seguimiento solar si se quiere llegar a altas temperaturas o bien cocinar las comidas de forma expedita, ya que en dos horas ya se alcanza a cocinar la comida en el interior en la olla.

Se debe mencionar que el funcionamiento sin tracker supera al funcionamiento sin espejo inferior de la experiencia anterior, ya que este alcanza los  $190^\circ\text{C}$  mientras que sin espejo pasa ligeramente los  $100^\circ\text{C}$ . Con esto se entiende la importancia del espejo inferior y su rol en la

cocina solar.

## **4.5. Propuesta de plataforma con seguidor solar**

Como se vio en la sección del seguidor solar, el seguimiento solar es una parte fundamental para la cocción de alimentos en cocinas solares si se quiere hacer de forma rápida, o en otro caso alcanzar temperaturas más altas de cocción. Es por esto que se diseña una plataforma en la cual se puedan poner un grupo de hasta cinco cocinas solares con el fin de poder calentar relativamente rápido un grupo de ollas con comida, que tiene la ventaja de no requerir gran cantidad de energía para su funcionamiento (solo la del motor para el seguimiento solar), no produce gases de efecto invernadero y tampoco contamina con material particulado como lo es con la leña, ya que el motor puede funcionar con energía solar.

En seguida se explicará cuáles son las partes que componen a esta plataforma que sigue al Sol, la lógica de su funcionamiento y por último los requisitos energéticos que esta tiene para su funcionamiento diario.

### **4.5.1. Componentes y armado de seguidor solar**

Para llevar a cabo la construcción de la plataforma con seguidor solar, primero se deben determinar los componentes básicos que esta debe tener para su funcionamiento. Luego se determina cómo van situados los unos respecto de los otros, para así poder realizar estudios dependiendo de la configuración que tenga y de ese modo determinar sus características funcionales.

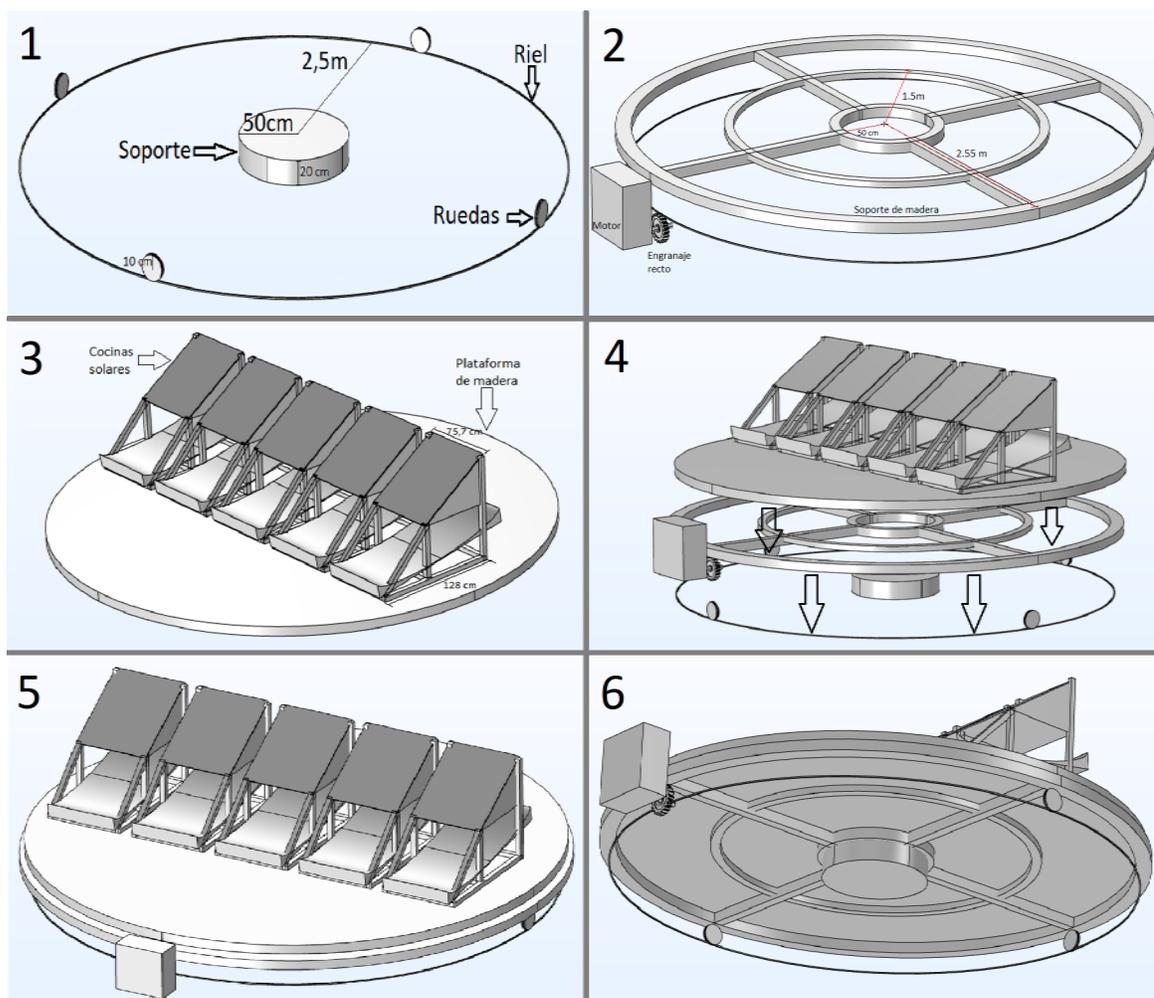


Figura 4.10: Componentes y armado del seguidor solar.

La configuración de la plataforma con seguidor solar se dividió en 3 partes principales:

En primer lugar, está la base, que como se puede ver en la figura 4.10 cuadro 1. Consta del soporte central que es un disco sólido de madera de 50 [cm] de radio, el riel de metal que guía las ruedas de portón, estas ruedas tienen un diámetro de 10 [cm].

En segundo lugar, está la parte media, que está representada en el cuadro 2 de la figura 4.10. Está constituido por la estructura de soporte que son vigas de madera cuyo radio desde el medio del círculo central a la orilla es 2,55 [m], el círculo central encaja con el soporte de la parte baja visto anteriormente; el motor cuyas características se verán en una sección siguiente; el engranaje recto del motor, cuya función es transmitir el torque del motor a la plataforma; y por último, el riel dentado con el que se impulsa la plataforma gracias al engranaje del motor.

En tercer lugar, está la parte superior, que está representada en el cuadro 3 de la figura 4.10. Aquí es donde se colocan las cocinas solares para la cocción de alimentos, se hacen caber 5 de ellas. Bajo estas cocinas está la plataforma de madera cuyo radio es de 2,5 [m] y sostiene a las 5 cocinas más las personas que trabajen en ellas.

Por último, todo se ensambla y configura como se ven en los cuadros 4, 5 y 6 de la figura 4.10, quedando la plataforma de seguimiento solar lista para su funcionamiento.

#### 4.5.2. Simulación de seguimiento solar

Para entender que el seguimiento solar funciona como se debe, primero se simulan las cocinas solares y se verifica que se mueve en sincronía con el Sol, recibiendo su radiación directamente. Es a partir de este razonamiento que se hace un modelo simplificado al visto en la sección anterior.

En el modelo simplificado se hace rotar la plataforma  $7,5^\circ$  cada  $30$  [min] por  $3,13$  [s], una vez alcanzado los  $180^\circ$ , se activa un sensor que manda un pulso de  $75,12$  [s] para que se realice un avance de  $180^\circ$  más, así queda en la posición original de  $0^\circ$  y se apaga, como se ve en la figura 4.11. De este modo, los rayos llegan de forma directa a las cocinas, y se puede apreciar en la figura 4.12 que las sombras indican que efectivamente el Sol apunta siempre de forma directa a estas cocinas solares.

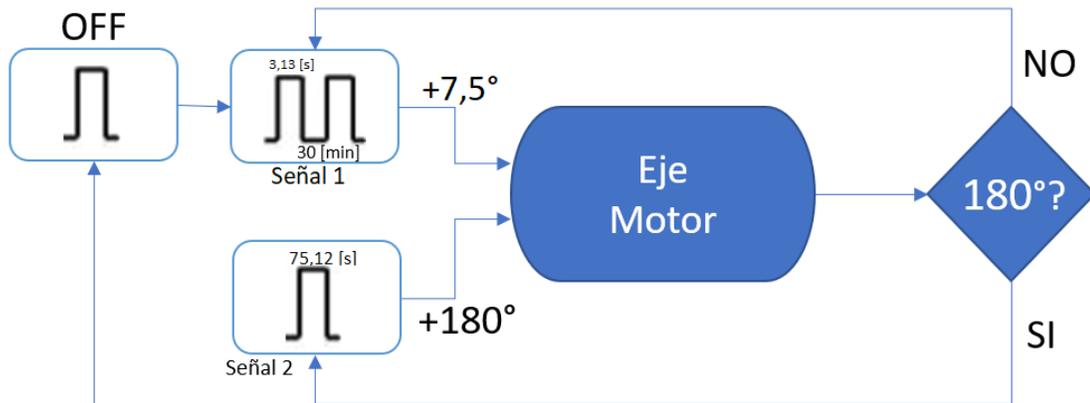


Figura 4.11: Lógica de control de seguimiento solar.

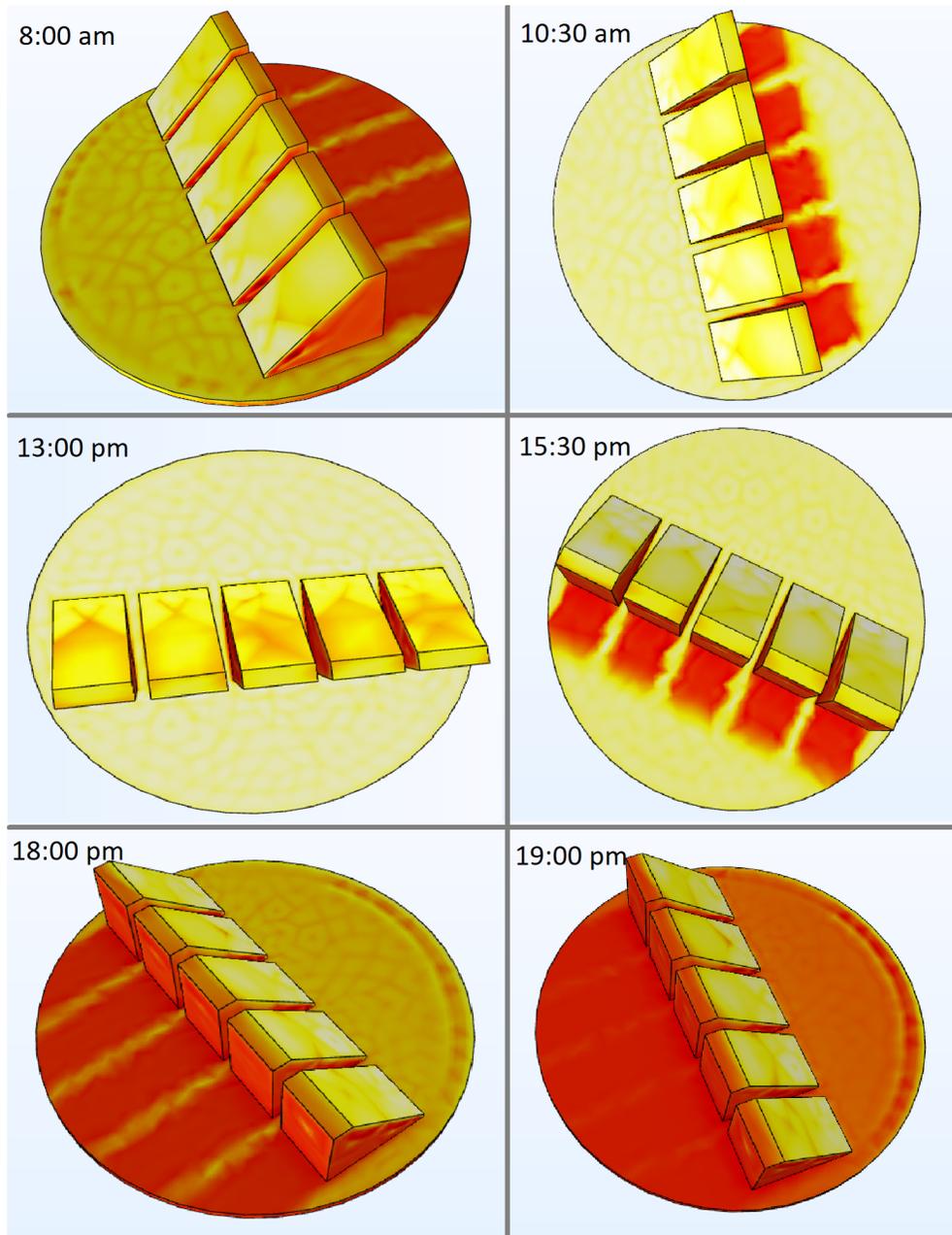


Figura 4.12: Seguimiento solar a lo largo del día.

Esta simulación se hizo en un día de enero de 8 am a 19 pm, para realizar un seguimiento a lo largo del año se debe integrar al sistema de control la fórmula de seguimiento solar en un eje, ecuación 2.1 que se encuentra en el marco teórico.

Con el fin de ahorrar energía es mejor utilizar el seguimiento solar hasta las 18:00 pm, ya que como se puede apreciar en la figura 4.12 a las 19:00 pm le llega muy poca radiación solar. Es por esto que conviene utilizar esa energía en el retorno a la posición inicial de la plataforma.

### 4.5.3. Cálculo de torque y energía de funcionamiento

Para lograr obtener la cantidad de energía que consume el sistema de seguimiento descrito en la sección anterior, primero se debe calcular cuánto torque debe ejercer el motor sobre la plataforma para que esta gire, lo que a su vez requiere los datos sobre el peso y roce de la plataforma que se debe hacer girar. Una vez obtenido el torque y analizado cuánto debe girar la plataforma, se puede obtener la cantidad de energía que esta requiera para funcionar por todo un día.

Para determinar el torque que debe ejercer el motor sobre la plataforma, primero se debe conocer el peso de la plataforma.

Tabla 4.1: Tabla de pesos.

| Material | Unidades | Peso [kg] | Total [kg] |
|----------|----------|-----------|------------|
| Cocinas  | 5        | 30        | 150        |
| Soporte  | 1        | 325       | 325        |
| Personas | 2        | 75        | 150        |
|          |          |           | 625        |

Con el peso total de la tabla 4.1 y las ecuaciones 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4 es posible calcular el torque necesario para mover la superficie y así hacer el seguimiento solar.

Si el peso en el disco se asume distribuido uniformemente sobre el disco y se suponen un conjunto de ruedas y rodamientos sobre los cuales este se apoya, la fuerza de roce a vencer se calculará con la ecuación 4.1.

$$F_r = c \cdot m \cdot g \quad (4.1)$$

El coeficiente de resistencia de rodadura para el tipo de ruedas utilizadas es representada con el parámetro  $c$ . Para esta aplicación se estima un valor de  $c=0,001^1$ . Por su parte, dada la geometría de la plataforma es posible estimar un torque de roce a vencer de acuerdo a la siguiente expresión, suponiendo el motor ubicado en la periferia de la plataforma.

$$\tau_{roce} = F_r \cdot r \quad (4.2)$$

Es importante mencionar que también es necesario vencer la inercia de la estructura a partir del reposo. Para ello, dada la geometría, la inercia puede ser calculada a través de la siguiente ecuación:

$$I = \frac{1}{2}m \cdot r^2 \quad (4.3)$$

Consecuentemente, suponiendo una aceleración angular  $\alpha$ , el torque resultante es:

$$\tau_{motor} = I \cdot \alpha \quad (4.4)$$

Los parámetros de las ecuaciones recién nombradas son  $m = 625$  [kg];  $c = 0,001$ ;  $g = 9,81$

<sup>1</sup> Gordon, David W. *Bicycling Science*. Cambridge, Mass. : MIT Press (c. 2004)

[m/s<sup>2</sup>]; radio  $r = 2,5$  [m]. De esta forma resulta un  $F_r = 6,13$  [N] y un  $\tau_{roce} = 12,7$  [Nm].

La siguiente imagen resume la situación descrita.

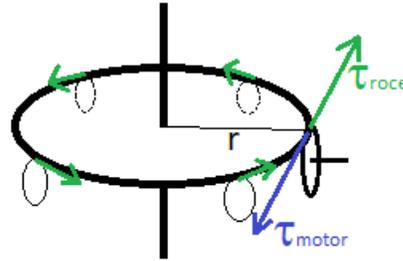


Figura 4.13: Diagrama de torques.

Despreciando la aceleración angular requerida, para una inercia estimada en  $I = 1953,1$  [kg · m<sup>2</sup>], sería necesario utilizar un motor capaz de vencer un torque debido al roce de 12,7 [Nm] y de soportar un sistema en torno a los 600 [kg] de peso. Si consideramos un factor de seguridad de 1,5 el requerimiento de torque crecería a 19,05 [Nm] para el motor seleccionado. Para ello, en el anexo A.2 se entregan las especificaciones del motor sugerido. Se constata que este motor es capaz de entregar un torque de entre 16,8-32 [Nm] y está diseñado para soportar cargas de hasta 650 [kg]. Asimismo, su potencia nominal es de 200 [W] permitiendo una velocidad de 50 [rpm]. Se considera que estas características son suficientes para traccionar el sistema propuesto.

Por su parte, considerando una velocidad de 50 [rpm] y un radio estimado de 2 [cm] (ver imagen A.1), para una revolución completa durante el día se requeriría 150 [s]. El cálculo asociado se detalla a continuación:

1. Distancia recorrida en un giro del motor de tracción equivale a  $2\pi \cdot r = 12,56$  [cm], con  $r = 2$  [cm].
2. Distancia recorrida por la superficie completa equivale a  $2\pi \cdot R = 15,7$  [m], con  $R = 2,5$  [m].
3. Consecuentemente, se requieren 125 revoluciones del motor de tracción para completar un giro completo de la plataforma, lo que corresponde a 2,5 [min] o 150 [s] de operación.
4. Suponiendo que cada 30 [min] se acciona el motor con el fin de realizar el seguimiento del Sol, esto implicaría una activación durante 3,13 [s] para lograr un avance de 7,5°. Este valor debe ser ajustado según cada latitud seleccionada para la ubicación de la cocina solar.

Finalmente, la estimación del consumo diario de energía para el sistema de seguimiento propuesto corresponderá a un motor de 200 [W] de potencia nominal operando durante 150 [s]. Esto corresponde a un consumo diario de  $W_{motor} = 200 \cdot 150/3600 = 8,3$  [Wh]. Cabe mencionar que la potencia nominal del motor ya incorpora las eficiencias eléctricas y mecánicas del

sistema.

Si se desea, el retorno a la posición inicial se puede hacer manualmente para así disminuir el consumo energético a la mitad. Del mismo modo, si se quiere que el torque del motor sea mayor o menor, se puede aumentar o disminuir el radio del engranaje recto del motor.

Se concluye que el requerimiento energético para el sistema de seguimiento es muy bajo y factible de ser realizado con tecnología disponible en el mercado.

## **4.6. Análisis por zona en Chile**

En esta sección se utilizará lo obtenido de las pruebas de funcionamiento de la cocina solar frente a distintas condiciones, y como la mejor opción obtenida a partir de los resultados fue utilizar la cocina con seguidor y espejo reflector, así será como se utilizará la cocina en los casos de estudio de la zona norte, centro y sur del país.

La finalidad de hacer este análisis es determinar en qué partes se pueden instalar este tipo de cocinas solares dada las condiciones climáticas y de radiación solar que tenga la zona. De este modo dejar claro en qué partes se puede instalar la plataforma con seguidor solar y en qué partes no conviene.

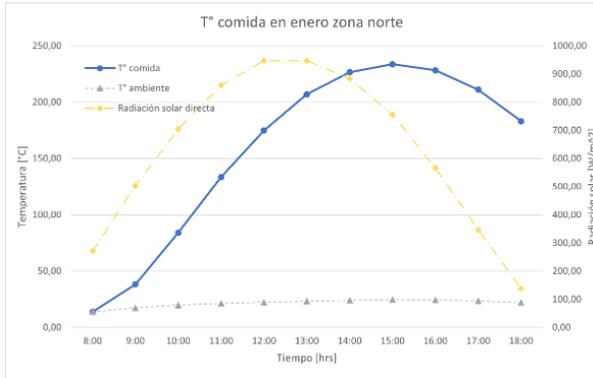
En seguida se mostrarán los resultados a partir de las simulaciones con el software COMSOL y el modelo de la cocina validada que se mencionó en la sección 2.5.

### **4.6.1. Caso en zona norte**

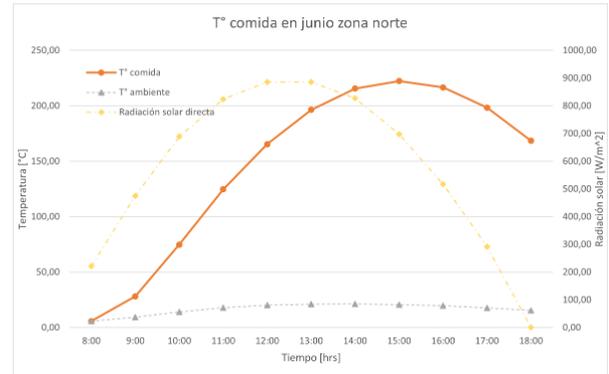
La zona norte de Chile es la parte en la cual hay mayor radiación del país, y con las condiciones climáticas favorables para el uso de tecnologías que aprovechen la radiación solar, ya que la poca nubosidad de la zona favorece el tiempo de exposición del dispositivo ocupado, así mejorando el desempeño de estas tecnologías por el solo hecho de estar recibiendo energía solar por más tiempo de forma directa.

Los estudios que se realizarán en esta zona son a partir de los datos obtenidos a partir del Explorador Solar de la ciudad de Calama. Se selecciona la información de radiación solar de 8:00 am a 18:00 pm, esto porque en las horas anteriores y siguientes no hay radiación solar en los datos, se recopila información del viento para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección de las paredes de la cocina y la probabilidad de nubes, que en un solo día es una probabilidad constante.

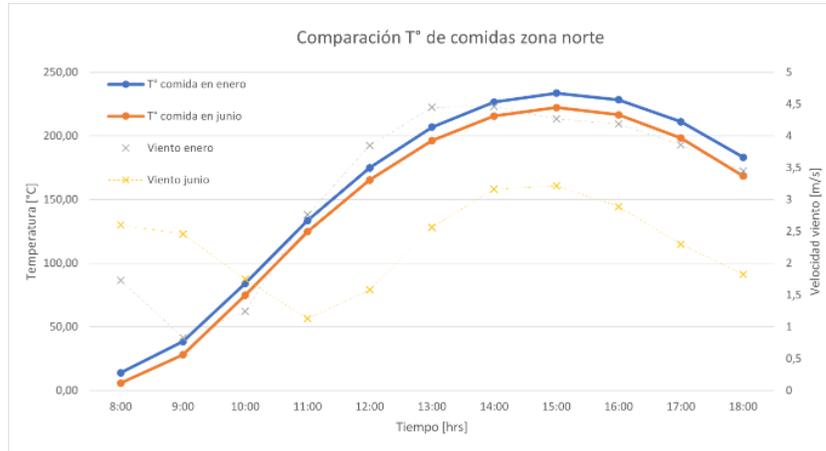
En este estudio se graficarán los comportamientos de temperatura del agua en la olla en los meses de enero y junio, así demostrando la diferencia de transferencia de calor al agua en el mes ideal para ocupar la cocina solar contra el peor mes para utilizarla.



(a) Caso zona norte en enero.



(b) Caso zona norte en junio.



(c) Comparación entre enero y junio zona norte.

Figura 4.14: Caso de estudio en zona norte.

Se puede observar a partir de la figura 4.14.a que bajo las condiciones de radiación y temperatura de la zona norte, el agua alcanza los  $100^{\circ}\text{C}$  en 2,25 horas de exposición, lo que es relativamente rápido si se considera que la radiación de 8 a 9 de la mañana es baja. La desventaja de calentamiento del agua en este lugar es la temperatura ambiente que hay, ya que a pesar de que es verano la temperatura no sobrepasa los  $25^{\circ}\text{C}$ , por lo que para llegar a los  $100^{\circ}\text{C}$  el agua debe aumentar  $75^{\circ}\text{C}$  su temperatura. El comportamiento visto en la figura 4.14.a es la mejor condición que se puede encontrar dentro de Chile para las cocinas solares, por lo que es importante entender su desempeño.

En la figura 4.14.b se aprecia que el comportamiento, a pesar de ser invierno, es bastante bueno, ya que alcanza una temperatura máxima de  $222^{\circ}\text{C}$ . Esto se debe a la poca variabilidad de condiciones climática durante el año en esta zona, dado que como se pudo ver en la sección de radiación solar a lo largo del año en la figura 4.1, la nubosidad y radiación solar son prácticamente constantes.

Por último, en la figura 4.14.c se observa la comparación de las temperaturas de las comidas obtenidas a partir de los gráficos de las figuras 4.14.a y 4.14.b. Por lo indicado en el párrafo anterior, es directo entender que la variación en el comportamiento entre verano e invierno es muy baja, dado que las condiciones climáticas son muy parecidas en los meses del año. También se grafica la velocidad del viento, que son datos promedio de todos los días del mes.

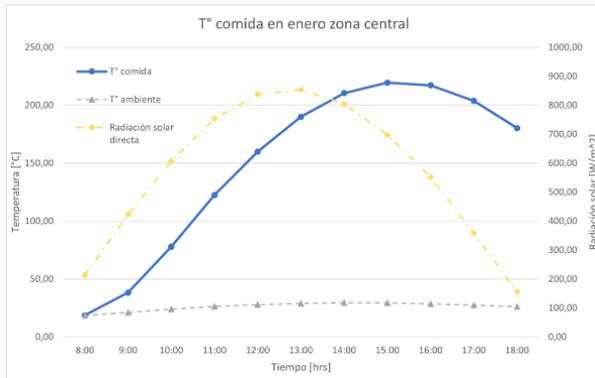
Estas sirven para determinar el coeficiente de transferencia de calor por convección, lo que influye levemente en las mediciones de temperatura simuladas, por lo que no se le da una gran relevancia en este trabajo.

#### **4.6.2. Caso en zona centro**

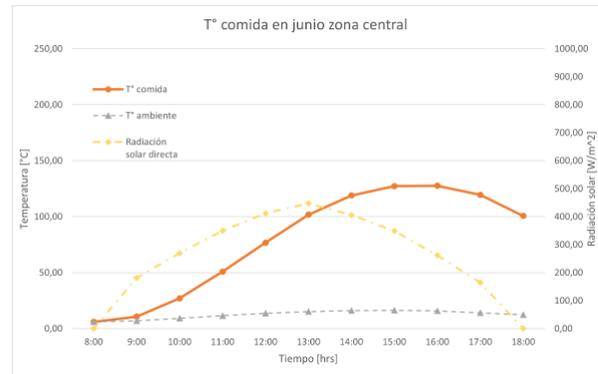
La zona centro de Chile se caracteriza por tener condiciones climáticas muy marcadas según las estaciones del año, por lo que en meses de verano se tiene una buena radiación solar, poca nubosidad y vientos moderados. Mientras que en invierno ocurre todo lo contrario, poca radiación solar dado lo bajo que estará el Sol a lo largo del día, la nubosidad aumenta considerablemente y el viento aumenta de velocidad. Por lo que el uso de tecnologías que aprovechen la energía solar tendrán un buen desempeño principalmente en los meses de verano, en otoño y primavera un desempeño moderado, y en invierno uno malo.

Las simulaciones que se realizarán en esta zona son a partir de los datos descargados del Explorador Solar de la ciudad de Santiago. Al igual que en el caso anterior se selecciona la información de radiación solar, nubosidad y viento para determinar las condiciones que el simulador debe tener al realizar el procesamiento de datos y determinar la transferencia de calor que se produce dentro, entremedio y fuera de la cocina solar.

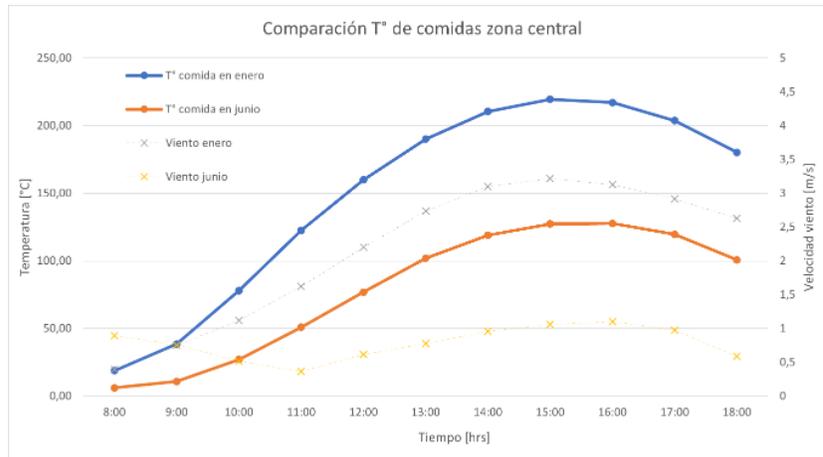
En este estudio se simula el comportamiento de la temperatura de la comida para verificar la diferencia que existe entre el mes de enero vs. el mes de junio en la ciudad de Santiago. Esto para demostrar la conveniencia de construir una plataforma con seguidor solar en función de la cantidad de comida que se pueda calentar con las cocinas sobre ella.



(a) Caso zona centro en enero.



(b) Caso zona centro en junio.



(c) Comparación entre enero y junio zona centro.

Figura 4.15: Caso de estudio en zona centro.

Como se puede ver en la figura 4.15.a, el comportamiento de la cocina solar con espejo inferior y seguidor solar es muy bueno, ya que alcanza una alta temperatura máxima, el aumento de temperatura es rápido, esto se ve demostrado al ver que alcanza los 100°C en 2,5 horas, considerado rápido para este tipo de cocina. Este comportamiento es muy parecido al visto en la zona norte, por lo que tiene un muy buen desempeño, teniendo la ventaja además de tener una temperatura que promedia los 26,2°C, un poco mayor a la vista en el norte de Chile en el mismo mes.

Ahora, si vemos el gráfico de la figura 4.15.b, se puede apreciar las malas condiciones que hay en esta época para el calentamiento de la comida con radiación solar. Esto se debe a que la radiación que hay es poca, alcanzando a las 13:00 hrs. el peak de 450 [W/m<sup>2</sup>]. Es lógico entonces que la temperatura máxima sea baja también, el gráfico muestra que alcanza los 130°C a las 15:00 hrs., lo que implica que se puede llegar a cocinar comida en junio en Santiago, pero va a tardar 5 horas en realizarse, por lo que se debe analizar si es útil la cocina solar frente a la demora. Cabe destacar que la probabilidad de nubes en el mes de junio es de un 18 %, lo que empeora los resultados en esta época del año en la zona.

En el gráfico de comparación de la figura 4.15.c, se puede observar la gran diferencia que se produce frente al clima de la zona. En enero la temperatura máxima es un 72 % mayor que la de junio, además en junio la probabilidad de nubes es de 18 % frente a un 5 % en enero.

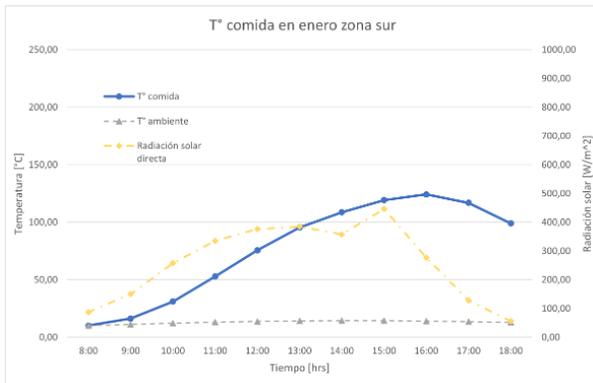
Es con esta comparación que se debe tomar en cuenta si se quiere construir la cocina solar y su plataforma en la zona, porque si se desea utilizar solo en verano es casi tan factible como en el norte del país, pero si también se desea su uso en invierno va a ser difícil que su funcionamiento sea óptimo por las razones recién descritas.

### **4.6.3. Caso en zona sur**

La zona sur de Chile se identifica por clima muy variado, tendiendo en general a haber precipitaciones y vientos veloces a lo largo del año. Es por esto que las condiciones en las que funcionaría la cocina solar no son ideales, ya que es necesario tener una buena fuente de radiación solar y poca nubosidad para llevar a cabo la cocción de los alimentos.

El estudio que se llevará a cabo se hace con los datos descargados a partir del Explorador Solar. Se selecciona la información de radiación solar, viento y probabilidad de nubes, al igual que en las experiencias pasadas.

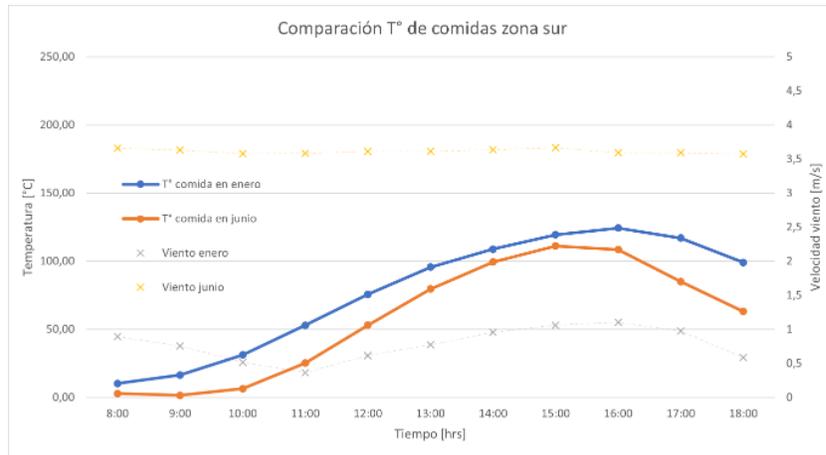
En este estudio se simula la temperatura de la comida frente a las condiciones de la zona. Se toma en cuenta la radiación solar directa y el viento para las simulaciones en los meses de enero y junio. Con esto se espera obtener información del desempeño de la cocina solar en la zona sur de Chile y con eso determinar si es factible su implementación en la zona o no.



(a) Caso zona sur en enero.



(b) Caso zona sur en junio.



(c) Comparación entre enero y junio zona sur.

Figura 4.16: Caso de estudio en zona sur.

Se puede apreciar en la figura 4.16.a que la radiación solar incluso en el mes de enero no supera los  $500 \text{ [W/m}^2\text{]}$ , por lo que el funcionamiento de la cocina solar será parecido a la época de invierno de la zona central, lo que no es un comportamiento deseable para esta cocina dado su funcionamiento lento. Los límites de los gráficos están en la misma escala que los gráficos pasados para que se aprecien las diferencias que existen en las simulaciones a simple vista. Se puede notar que en esta época la comida llega a los  $100^\circ\text{C}$  un poco después de las 13:00 hrs. con lo que implica que se deberá tener 5 horas expuesta la cocina solar para que se pueda cocinar comida, y si a esto sumamos que además en esas 5 horas no debe haber nubosidad, se hace muy difícil la implementación de la cocina solar bajo estas condiciones, ya que la probabilidad de nubosidad en la zona sur es muy alta.

En cuanto a la figura 4.16.b, se puede apreciar que al igual que en enero, cocinar la comida lleva muchas horas, ya que se requieren 6 horas para que la comida llegue a los  $100^\circ\text{C}$  y la temperatura máxima no supera los  $111^\circ\text{C}$ . Esto se debe a que la temperatura ambiente promedio es de  $3,8^\circ\text{C}$ , lo dificulta el calentamiento de la cocina solar pese a la aislación que esta posee.

Por último, se puede ver en la figura 4.16.c la comparación entre los meses del año simulados. Si bien en ambos casos se logra llegar a temperatura de ebullición del agua, el tiempo que esta tarda en llegar a esa temperatura lo hace una solución poco viable para esta zona, ya

que a menos que se quiera tener agua hirviendo una vez al día, la demora de 5-6 horas en hacerla es un desempeño muy bajo, sobre todo cuando se compara con el desempeño en la zona norte del país donde se demora una tercera parte en alcanzar los 100°C el agua.

# Capítulo 5

## Conclusiones y trabajo futuro

### 5.1. Conclusiones

El objetivo principal de este trabajo de título fue realizar un modelo computacional de una cocina solar construida en India, y con ese modelo realizar simulaciones que determinen el desempeño de la cocina en distintas regiones de Chile. Luego se propone un modelo de una plataforma con seguimiento solar, en la cual se ubican cinco de estas cocinas y se determina su funcionamiento. De dicho trabajo se concluye lo siguiente:

En cuanto al estudio de radiación solar, se puede decir que dependiendo de la zona que se quiera investigar se van a tener resultados muy distintos. En el caso chileno, la zona norte posee un clima muy distinto a la zona central o sur del territorio nacional, ya que se diferencian tanto en cantidad de radiación solar como en nubosidad. Es por esto que el estudio de radiación solar es importante para poder determinar el comportamiento de la cocina solar a lo largo del año, como fue visto en las secciones de análisis térmico y de trazado de rayos.

A partir de la sección de validación de la cocina simulada, se puede entender que el funcionamiento del simulador es similar al comportamiento real de la cocina solar, ya que si bien existen pequeñas diferencias entre la curva real y la simulada, estos comportamientos son esperables, dado que en el modelo computacional hay fenómenos que no se pueden simular o son muy difíciles de predecir. Por ejemplo, en los datos reales se aprecia que existe un comportamiento errático dada la infinidad de elementos que interactúan al momento de hacer mediciones en una zona determinada. Esto, más el error de los instrumentos, producen una línea menos suave que en la simulada. Ahora, si comparamos las líneas en ambas figuras tanto del caso con reflector inferior como del caso sin reflector inferior, se puede concluir que es un resultado cercano y subestimado al comportamiento real de la cocina, ya que en ambos casos la curva obtenida a partir de las pruebas reales esta por sobre la curva simulada. Esta diferencia entre las curvas se debe a que los estudios de Ray Tracing y de transferencia de calor se deben hacer por separado, lo que produce que los resultados obtenidos a partir de la simulación de la cocina no estén completamente acoplados. También se debe considerar el hecho que en la simulación no se pudo incluir la evaporación del agua, comportamiento que hace que la temperatura al llegar a los 100°C se mantenga fija, por lo que el sentido de las curvas se diferencia en las cercanías de los 100°C.

En el estudio térmico de la cocina solar se pueden apreciar las variables más significativas

al momento de realizar la simulación. En primer lugar, en el análisis del reflector se puede distinguir la diferencia que hace el tener un espejo reflector que apunte la radiación solar a la superficie inferior del compartimiento de la cocina solar. Pese a realizarse el estudio con tracker, la temperatura que alcanza sin el espejo inferior es significativamente menor a la alcanzada en el caso con espejo inferior. En segundo lugar, está el análisis de la importancia del sistema de tracking, esta vez con reflector inferior en ambos casos. De aquí se desprende que, si bien el comportamiento no es tan marcado como en el caso sin espejo, aun así se puede apreciar que en el caso sin seguimiento solar, el desempeño de la cocina solar es peor que en el caso con seguimiento. De aquí se entiende la importancia que hay en implementar el espejo inferior y el sistema de seguimiento para que la cocina solar tenga un buen desempeño en donde se sitúe.

Para la propuesta de la plataforma con seguidor solar se desprende que su construcción se compone por materiales comunes y con materiales relativamente baratos, por lo que si se desea llevar a cabo la construcción de la plataforma será un proceso moderadamente complejo de realizar. A partir de la simulación de seguimiento solar, se aprecia que con el método empleado de seguimiento, el Sol siempre llegará de frente a las cocinas solares, permitiendo así que su desempeño sea óptimo. Además, en ningún momento se producen sombras entre cocinas con el sistema recién mencionado, lo que podría ser otra pérdida sustancial de energía [4]. Por último, en esta sección se realiza el cálculo de torque necesario para mover la plataforma y la energía que se necesita para su operación durante un día de funcionamiento. De aquí se concluye que la cantidad de energía para su operación es bajo, dado que está en el rango de los 8,3 [Wh] por día.

Por último, en los casos de estudio se puede comprender la importancia que tiene la localización en que se ubique la cocina solar, ya que como se vio en los resultados, si se quiere ubicar en el sur del país, el desempeño de las cocinas es apenas suficiente para hacer hervir agua en un periodo de tiempo bastante largo. En cambio, si vamos a la zona norte se tiene que en 2,25 horas se llega a los 100°C, lo que es un desempeño deseable para las cocinas solares. También se pudo observar que hay zonas en donde dependerá de los requerimientos que la cocina tenga por épocas, dado que en la zona centro de Chile las condiciones climáticas son ideales en el periodo de verano, pero en invierno se ve muy reducido producto de la temperatura ambiental y nubosidad.

Finalmente, se puede concluir que los resultados obtenidos a partir de este estudio logran el objetivo principal, que era determinar el desempeño de la cocina solar mediante simulaciones, en las que se determinó el desempeño que hay a lo largo de Chile en tres zonas del país. También se propuso el diseño de una plataforma que realiza seguimiento solar, para la cual se realizaron estudios de gasto energético y partes que esta requiere para su funcionamiento.

## 5.2. Trabajo futuro

El trabajo de título realizado tiene la función de ser la primera etapa en la que se pueda basar un proyecto futuro que quiera realizar este tipo de instalaciones en alguna zona de Chile. Si en un futuro se desea seguir con un proyecto que utilice la información recopilada en este trabajo, se recomienda hacer estudios más detallados en cuanto a la plataforma rotatoria que

realiza seguimiento solar, ya que se hicieron muchos supuestos para determinar su tamaño y composición, por ejemplo se podría realizar una prueba de estrés a los materiales, ya que realizar esta prueba se escapaba de los alcances de este trabajo. Además, se propone que se investigue una forma de acoplar los estudios de trazado de rayos con los estudios de transferencia de calor, para que los resultados obtenidos queden acoplados inmediatamente en una misma simulación.

Por último, se propone que para mejorar la eficiencia en la zona sur de Chile de las cocinas solares, se implemente un sistema de calentamiento con la energía excedente que hace girar la plataforma. Dada la cantidad de energía que se necesita para hacer girar la plataforma, se deduce que basta con paneles solares para que funcione, por lo tanto, se puede hacer que la energía excedente que provenga de estos paneles se utilice en una cocinilla eléctrica que vaya alrededor de la olla, para que de este modo no interfiera con la transferencia de calor proveniente del reflejo del Sol por el espejo inferior en la base de la olla.

# Bibliografía

- [1] M.A. Tawfik, Atul A. Sagade, Rodrigo Palma-Behnke, Hanan M. El-Shal, W.E. Abd Allah, Solar cooker with tracking-type bottom reflector: An experimental thermal performance evaluation of a new design, *Solar Energy*, Volume 220, 2021, Pages 295-315.
- [2] S. M. Jeter, "The distribution of concentrated solar radiation in paraboloidal collectors," *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 108, pp. 219-225, 1986.
- [3] G. Johnston, "Focal region measurements of the 20 m<sup>2</sup> tiled dish at the Australian national university," *Solar Energy*, Vol. 63, No. 2, pp. 117-124, 1998.
- [4] M. Schubnell, "Sunshape and its influence on the flux distribution in imaging solar concentrators," *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 114, pp. 260-266, 1992.
- [5] F. Griesmer (2013, Mayo 1). The Greenhouse Effect.[Online]. Disponible: <https://www.comsol.com/blogs/the-greenhouse-effect/>
- [6] Disponible: <https://www.solarcookers.org/work/capacity>
- [7] D. De Rooij. Single Axis Trackers: Introduction And Advantages. [Online]. Disponible: <https://sinovoltaics.com/learning-center/csp/single-axis-trackers/>
- [8] C. Xie. (2016, Julio). Modeling dual-axis solar trackers in Energy3D. [Online]. Disponible: <http://molecularworkbench.blogspot.com/2016/07/a-dual-axis-solar-tracker-in-energy3d.html>
- [9] A. Shitzer. (2006). Wind-chill-equivalent temperatures: Regarding the impact due to the variability of the environmental convective heat transfer coefficient. *International journal of biometeorology*. 50. 224-32. 10.1007/s00484-005-0011-x.
- [10] W. Marion. (2013, Julio) Rotation Angle for the Optimum Tracking of One-Axis Trackers. [Online] Disponible: <https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/58891.pdf>.
- [11] Stickler, Greg. "Educational Brief - Solar Radiation and the Earth System". National Aeronautics and Space Administration. Archived from the original on 25 April 2016. Retrieved 5 May 2016.
- [12] Disponible: <https://es.wikipedia.org/wiki/Radiaciónsolar/media/>
- [13] Disponible: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/fe/Obliquerays.svg>

[14] Khavrus, V.; Shelevytsky, I. (2010). «Introduction to solar motion geometry on the basis of a simple model»

[15] Disponible: <https://www.comsol.com/blogs/how-to-model-solar-concentrators-with-the-ray-optics-module/>

[16] Disponible: <https://www.researchgate.net/figure/Beam-and-diffuse-irradiation-types-emerge-due-to-weather-conditions-11fig1264858489>

[17] Disponible: <http://www.aros-solar.com/es/la-radiacion-solar>

# Anexo A

## Datos y tablas

### A.1. Motor

Posible motor que funciona con las características presentadas en el trabajo, se puede modificar el radio del engranaje para que coincida el torque, la fuerza de este motor alcanza para soportar el torque de un engranaje de mayor diámetro.



Figura A.1: Imagen motor propuesto.

|                               |  |
|-------------------------------|--|
| voltaje nominal               | 220v $\pm$ 10% / 110 $\pm$ 10% 50hz / 60hz |
| motor eléctrico               | 220vac / 110vac                            |
| potencia nominal del motor    | 200w                                       |
| módulo de engranaje           | m = 4                                      |
| peso máximo de carga          | 650 kg                                     |
| Velocidad de salida           | 50r/ min $\pm$ 10%                         |
| par de salida (n.m)           | 16.8-32.0n.m                               |
| tipo de interruptor de límite | magnético                                  |
| fuerza max.pull               | 1100n                                      |
| ruido                         | 55 dba                                     |
| temperatura de trabajo        | -20 °c ~ +55°do                            |

Figura A.2: Características del motor.

## A.2. Datos reales

En seguida se mostrarán los datos reales a partir de los cuales se obtuvo las curvas en la sección de validación del modelo.

Tabla A.1: Datos reales sin espejo primera parte.

| <b>Datos de cocción real sin espejo inferior</b> |                              |                        |                             |
|--|------------------------------|------------------------|-----------------------------|
| <b>Tiempo</b>                                    | <b>Temperatura de comida</b> | <b>Radiación solar</b> | <b>Temperatura ambiente</b> |
| 0  | 35                           | 847                    | 33,5                        |
| 2  | 36,1                         | 857                    | 34,1                        |
| 4  | 37,6                         | 866                    | 33,6                        |
| 6  | 38                           | 866                    | 33,3                        |
| 8  | 39,5                         | 870                    | 33,3                        |
| 10   | 40,8                         | 870                    | 33,6                        |
| 12   | 42                           | 874                    | 33,8                        |
| 14   | 43,3                         | 874                    | 34,3                        |
| 16   | 45,5                         | 874                    | 34,1                        |
| 18   | 46,7                         | 878                    | 34,3                        |
| 20   | 48,8                         | 880                    | 33,8                        |
| 22   | 52,8                         | 884                    | 33,9                        |
| 24   | 55,1                         | 887                    | 33,9                        |
| 26   | 57,4                         | 887                    | 34,1                        |
| 28   | 58,9                         | 890                    | 33,8                        |
| 30   | 61,2                         | 891                    | 33,8                        |
| 32   | 62,7                         | 892                    | 34                          |
| 34   | 64                           | 885                    | 33,8                        |
| 36   | 65,3                         | 888                    | 34,7                        |
| 38   | 66,8                         | 890                    | 34,5                        |
| 40   | 68                           | 893                    | 34,7                        |

Tabla A.2: Datos reales sin espejo segunda parte.

| <b>Datos de cocción real sin espejo inferior</b> |                              |                        |                             |
|--|------------------------------|------------------------|-----------------------------|
| <b>Tiempo</b>                                    | <b>Temperatura de comida</b> | <b>Radiación solar</b> | <b>Temperatura ambiente</b> |
| 42   | 69,6                         | 884                    | 34,2                        |
| 44   | 71,7                         | 877                    | 34,5                        |
| 46   | 72,8                         | 890                    | 35                          |
| 48   | 73,8                         | 893                    | 35,2                        |
| 50   | 75                           | 893                    | 35,2                        |
| 52   | 76,4                         | 891                    | 35,6                        |
| 54   | 77,8                         | 891                    | 35,7                        |
| 56   | 79                           | 891                    | 35,4                        |
| 58   | 80,2                         | 889                    | 35,7                        |
| 60   | 81,4                         | 891                    | 35,9                        |
| 62   | 82,4                         | 893                    | 35,9                        |
| 64   | 83,3                         | 893                    | 35,9                        |
| 66   | 84,4                         | 891                    | 35,5                        |
| 68   | 85,6                         | 885                    | 35,6                        |
| 70   | 86,3                         | 898                    | 35,6                        |
| 72   | 87,6                         | 896                    | 35,8                        |
| 74   | 88,7                         | 900                    | 35,8                        |
| 76   | 90                           | 900                    | 35,8                        |
| 78   | 91,2                         | 903                    | 35,9                        |
| 80   | 92,7                         | 901                    | 36,1                        |

Tabla A.3: Datos reales sin espejo tercera parte.

| <b>Datos de cocción real sin espejo inferior</b> |                              |                        |                             |
|--|------------------------------|------------------------|-----------------------------|
| <b>Tiempo</b>                                    | <b>Temperatura de comida</b> | <b>Radiación solar</b> | <b>Temperatura ambiente</b> |
| 82   | 93,4                         | 904                    | 35,8                        |
| 84   | 93,9                         | 905                    | 35,9                        |
| 86   | 94,2                         | 905                    | 36                          |
| 88   | 91                           | 908                    | 36                          |
| 90   | 91,2                         | 910                    | 36,2                        |
| 92   | 92,3                         | 910                    | 36                          |
| 94   | 93,1                         | 914                    | 36,5                        |
| 96   | 93,8                         | 911                    | 36,3                        |
| 98   | 94,4                         | 915                    | 36,4                        |
| 100  | 95                           | 918                    | 36,2                        |
| 102  | 95,4                         | 918                    | 36,2                        |
| 104  | 95,7                         | 919                    | 35,7                        |
| 106  | 96                           | 922                    | 35,9                        |

Tabla A.4: Datos reales con espejo primera parte.

| Datos de cocción real con espejo inferior |                       |                 |                      |
|---|-----------------------|-----------------|----------------------|
| Tiempo                                    | Temperatura de comida | Radiación solar | Temperatura ambiente |
| 0   | 34,8                  | 857             | 33,7                 |
| 2   | 37                    | 860             | 34                   |
| 4   | 40,2                  | 864             | 34                   |
| 6   | 43,2                  | 872             | 33,7                 |
| 8   | 46,1                  | 868             | 33,9                 |
| 10  | 48,7                  | 870             | 34                   |
| 12  | 51,2                  | 875             | 34                   |
| 14  | 53,6                  | 877             | 34,1                 |
| 16  | 56,7                  | 883             | 33,7                 |
| 18  | 59,8                  | 880             | 34,1                 |
| 20  | 62                    | 888             | 34,3                 |
| 22  | 63,9                  | 891             | 34,5                 |
| 24  | 65,6                  | 893             | 34,7                 |
| 26  | 67,4                  | 893             | 34,9                 |
| 28  | 69,8                  | 895             | 35                   |
| 30  | 71,4                  | 894             | 34,8                 |
| 32  | 73,2                  | 898             | 35                   |
| 34  | 75,3                  | 898             | 34,6                 |
| 36  | 77,2                  | 900             | 34,8                 |
| 38  | 78,3                  | 902             | 34,9                 |
| 40  | 80,2                  | 900             | 35,1                 |

Tabla A.5: Datos reales con espejo segunda parte.

| Datos de cocción real con espejo inferior |                       |                 |                      |
|---|-----------------------|-----------------|----------------------|
| Tiempo                                    | Temperatura de comida | Radiación solar | Temperatura ambiente |
| 42  | 82,6                  | 900             | 35,3                 |
| 44  | 84,5                  | 903             | 35                   |
| 46  | 86,8                  | 904             | 35                   |
| 48  | 88,4                  | 905             | 35,6                 |
| 50  | 90                    | 901             | 35,7                 |
| 52  | 91,2                  | 903             | 35,7                 |
| 54  | 92,2                  | 900             | 36                   |
| 56  | 93                    | 902             | 36,1                 |
| 58  | 94                    | 906             | 35,8                 |
| 60  | 94,8                  | 906             | 36                   |
| 62  | 95,4                  | 909             | 36                   |
| 64  | 95,9                  | 907             | 36,3                 |
| 66  | 96,3                  | 905             | 36,3                 |
| 68  | 96,5                  | 908             | 36,7                 |
| 70  | 96,5                  | 910             | 36,8                 |

### A.3. Datos para simulaciones y resultados

Tabla A.6: Radiación zona norte anual.

| Norte<br>MES | Intensidad radiación en cocina | Radiación directa |
|--------------|--------------------------------|-------------------|
| Enero        | 5137,5                         | 946,7818          |
| Febrero      | 5246,2                         | 965,9362          |
| Marzo        | 5641,4                         | 1036,453          |
| Abril        | 5504,7                         | 973,8156          |
| Mayo         | 5160,8                         | 953,3671          |
| Junio        | 5024,3                         | 886,0903          |
| Julio        | 5061,3                         | 921,5597          |
| Agosto       | 5221,1                         | 989,4587          |
| Septiembre   | 5772,6                         | 1040,409          |
| Octubre      | 5784,3                         | 1065,123          |
| Noviembre    | 5649,2                         | 1037,889          |
| Diciembre    | 5563,8                         | 990,1531          |

Tabla A.7: Radiación zona centro anual.

| Centro<br>MES | Intensidad radiación en cocina | Radiación directa |
|---------------|--------------------------------|-------------------|
| Enero         | 3894,8                         | 837,7854          |
| Febrero       | 3884,8                         | 832,7409          |
| Marzo         | 3662,8                         | 789,6419          |
| Abril         | 2978,6                         | 640,0202          |
| Mayo          | 2146,9                         | 459,1517          |
| Junio         | 1904                           | 412,2784          |
| Julio         | 1849,7                         | 397,4436          |
| Agosto        | 2001,9                         | 430,1401          |
| Septiembre    | 2272,8                         | 488,3661          |
| Octubre       | 2745                           | 587,0779          |
| Noviembre     | 3405,8                         | 741,4195          |
| Diciembre     | 3729,6                         | 791,4612          |

Tabla A.8: Radiación zona sur anual.

| Sur<br>MES | Intensidad radiación en cocina | Radiación directa |
|------------|--------------------------------|-------------------|
| Enero      | 1936,9                         | 338,7679          |
| Febrero    | 2192,7                         | 380,9043          |
| Marzo      | 2114,2                         | 363,6431          |
| Abril      | 2149,6                         | 369,8868          |
| Mayo       | 2516,2                         | 436,4103          |
| Junio      | 2252,8                         | 387,6493          |
| Julio      | 2197,7                         | 381,7232          |
| Agosto     | 1861,5                         | 320,3198          |
| Septiembre | 2148,5                         | 372,2043          |
| Octubre    | 2489,4                         | 431,0813          |
| Noviembre  | 1869,3                         | 321,6484          |
| Diciembre  | 2404,5                         | 416,3122          |

Tabla A.9: Con vs. sin reflector.

| hrs   | con reflector | sin reflector | radiación directa enero norte | T        |
|-------|---------------|---------------|-------------------------------|----------|
| 8:00  | 13,8          | 13,8          | 271,0327                      | 13,84286 |
| 9:00  | 38,9          | 32,4          | 503,3335                      | 17,53829 |
| 10:00 | 85,7          | 55,9          | 704,1531                      | 19,97083 |
| 11:00 | 136,6         | 78,6          | 861,024                       | 21,38267 |
| 12:00 | 180,2         | 96,7          | 946,7818                      | 22,39071 |
| 13:00 | 214,0         | 107,1         | 946,8843                      | 23,26702 |
| 14:00 | 234,8         | 113,3         | 883,6453                      | 24,08956 |
| 15:00 | 242,8         | 114,2         | 755,7553                      | 24,72645 |
| 16:00 | 237,8         | 108,4         | 566,0153                      | 24,50503 |
| 17:00 | 220,3         | 94,5          | 346,5822                      | 23,55757 |
| 18:00 | 192,3         | 77,0          | 139,3376                      | 21,88179 |

Tabla A.10: Sin vs. con tracker.

| hrs   | sin tracker | con tracker | radiación directa enero norte | T        |
|-------|-------------|-------------|-------------------------------|----------|
| 8:00  | 13,84       | 13,8        | 271,0327                      | 13,84286 |
| 9:00  | 17,38       | 38,4        | 503,3335                      | 17,53829 |
| 10:00 | 37,75       | 84,1        | 704,1531                      | 19,97083 |
| 11:00 | 82,47       | 133,4       | 861,024                       | 21,38267 |
| 12:00 | 135,02      | 174,9       | 946,7818                      | 22,39071 |
| 13:00 | 173,54      | 206,9       | 946,8843                      | 23,26702 |
| 14:00 | 190,51      | 226,5       | 883,6453                      | 24,08956 |
| 15:00 | 183,89      | 233,6       | 755,7553                      | 24,72645 |
| 16:00 | 159,23      | 228,3       | 566,0153                      | 24,50503 |
| 17:00 | 127,79      | 211,1       | 346,5822                      | 23,55757 |
| 18:00 | 93,81       | 183,3       | 139,3376                      | 21,88179 |

Tabla A.11: Caso estudio zona norte.

|       | temp comida |        | radiacion |        | temp  |       | viento  |         |
|-------|-------------|--------|-----------|--------|-------|-------|---------|---------|
| norte | enero       | junio  | enero     | junio  | enero | junio | enero   | junio   |
| 8:00  | 13,84       | 5,81   | 271,03    | 221,69 | 13,8  | 5,8   | 1,73129 | 2,60334 |
| 9:00  | 38,36       | 28,12  | 503,33    | 475,12 | 17,5  | 9,3   | 0,82846 | 2,45688 |
| 10:00 | 84,10       | 74,83  | 704,15    | 689,00 | 20,0  | 14,1  | 1,24338 | 1,74679 |
| 11:00 | 133,44      | 124,73 | 861,02    | 823,92 | 21,4  | 17,8  | 2,76312 | 1,13161 |
| 12:00 | 174,93      | 165,41 | 946,78    | 886,09 | 22,4  | 20,1  | 3,85137 | 1,58225 |
| 13:00 | 206,89      | 196,37 | 946,88    | 885,59 | 23,3  | 21,2  | 4,44924 | 2,56321 |
| 14:00 | 226,54      | 215,59 | 883,65    | 827,30 | 24,1  | 21,3  | 4,4633  | 3,1623  |
| 15:00 | 233,60      | 222,29 | 755,76    | 697,25 | 24,7  | 20,6  | 4,26792 | 3,21661 |
| 16:00 | 228,31      | 216,54 | 566,02    | 517,39 | 24,5  | 19,7  | 4,18803 | 2,88932 |
| 17:00 | 211,12      | 198,30 | 346,58    | 291,60 | 23,6  | 17,8  | 3,85869 | 2,29647 |
| 18:00 | 183,25      | 168,48 | 139,34    | 0,00   | 21,9  | 15,3  | 3,44925 | 1,82475 |

Tabla A.12: Caso estudio zona centro.

|        | temp comida |        | radiacion |        | temp  |       | viento  |         |
|--------|-------------|--------|-----------|--------|-------|-------|---------|---------|
| centro | enero       | junio  | enero     | junio  | enero | junio | enero   | junio   |
| 8:00   | 18,66       | 6,03   | 213,86    | 0,00   | 18,7  | 6,0   | 0,39153 | 0,89196 |
| 9:00   | 38,34       | 10,74  | 422,77    | 181,56 | 21,2  | 7,0   | 0,74952 | 0,75509 |
| 10:00  | 77,89       | 27,05  | 606,29    | 269,84 | 23,9  | 9,1   | 1,11919 | 0,51319 |
| 11:00  | 122,44      | 50,87  | 753,94    | 349,72 | 26,3  | 11,6  | 1,62068 | 0,36312 |
| 12:00  | 159,92      | 76,82  | 837,79    | 412,28 | 28,0  | 13,6  | 2,1992  | 0,61417 |
| 13:00  | 190,03      | 101,86 | 853,59    | 447,41 | 29,0  | 15,3  | 2,73587 | 0,77399 |
| 14:00  | 210,50      | 119,00 | 805,17    | 405,68 | 29,7  | 16,1  | 3,1001  | 0,95556 |
| 15:00  | 219,45      | 127,29 | 697,83    | 348,91 | 29,3  | 16,3  | 3,21565 | 1,05949 |
| 16:00  | 217,14      | 127,65 | 552,46    | 261,88 | 28,5  | 15,8  | 3,12613 | 1,10079 |
| 17:00  | 203,74      | 119,50 | 357,29    | 164,33 | 27,5  | 14,1  | 2,9138  | 0,97324 |
| 18:00  | 180,29      | 100,69 | 156,11    | 0,00   | 26,1  | 12,4  | 2,62646 | 0,58574 |

Tabla A.13: Caso estudio zona sur.

| sur   | temp comida |        | radiacion |        | temp  |       | viento  |         |
|-------|-------------|--------|-----------|--------|-------|-------|---------|---------|
|       | enero       | junio  | enero     | junio  | enero | junio | enero   | junio   |
| 8:00  | 10,21       | 2,82   | 87,28     | 0,00   | 10,2  | 2,8   | 0,89196 | 3,65675 |
| 9:00  | 16,36       | 1,55   | 150,67    | 7,77   | 11,2  | 2,8   | 0,75509 | 3,63158 |
| 10:00 | 31,18       | 6,39   | 258,37    | 220,49 | 12,3  | 3,2   | 0,51319 | 3,57646 |
| 11:00 | 52,90       | 25,18  | 335,00    | 345,57 | 13,1  | 3,7   | 0,36312 | 3,58386 |
| 12:00 | 75,63       | 53,04  | 376,71    | 387,65 | 13,7  | 4,1   | 0,61417 | 3,61078 |
| 13:00 | 95,57       | 79,49  | 384,84    | 399,53 | 14,2  | 4,4   | 0,77399 | 3,61265 |
| 14:00 | 108,76      | 99,37  | 358,21    | 361,71 | 14,5  | 4,6   | 0,95556 | 3,6344  |
| 15:00 | 119,34      | 111,20 | 446,35    | 468,33 | 14,5  | 4,4   | 1,05949 | 3,66645 |
| 16:00 | 124,28      | 108,46 | 277,41    | 0,00   | 14,1  | 4,0   | 1,10079 | 3,58974 |
| 17:00 | 116,89      | 84,93  | 128,70    | 0,00   | 13,6  | 3,8   | 0,97324 | 3,59098 |
| 18:00 | 99,06       | 63,02  | 55,99     | 0,00   | 13,0  | 3,6   | 0,58574 | 3,57477 |