



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

ESTUDIO TEÓRICO Y EXPERIMENTAL DE COLECTOR SOLAR PARABÓLICO PARA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO
CIVIL ELECTRICISTA

JORGE QUINTEROS GRIJALVA

PROFESOR GUÍA:
RODRIGO PALMA BEHNKE

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
LUIS VARGAS DÍAZ
CARLOS GHERARDELLI DEZEREGA

SANTIAGO - CHILE
2008

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA

ESTUDIO TEÓRICO Y EXPERIMENTAL DE COLECTOR SOLAR PARABÓLICO
PARA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

JORGE QUINTEROS GRIJALVA

COMISIÓN EXAMINADORA	CALIFICACIONES		
	NOTA (n°)	(Letras)	FIRMA
PROFESOR GUÍA SR. RODRIGO PALMA	:		
PROFESOR CO-GUÍA SR. LUIS VARGAS	:		
PROFESOR INTEGRANTE SR. CARLOS GHERARDELLI	:		
NOTA FINAL EXAMEN DE TÍTULO	:		

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA

SANTIAGO DE CHILE
SEPTIEMBRE 2008

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA
POR: JORGE QUINTEROS GRIJALVA
FECHA: 25/08/2008
PROF. GUÍA: SR. RODRIGO PALMA

ESTUDIO TEÓRICO Y EXPERIMENTAL DE COLECTOR SOLAR PARABÓLICO PARA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

La eficiencia energética y la búsqueda de nuevas fuentes de energía han llevado a investigar aplicaciones de la energía solar para generación de energía Eléctrica. Un colector solar parabólico, junto con un ciclo de vapor para generación o un motor Stirling, pueden ser alternativas válidas de implementación para generación distribuida (GD), sobre todo en regiones de Chile donde existe una alta radiación solar.

Los objetivos generales de este trabajo son mostrar que la energía necesaria para desarrollar el seguimiento solar del colector parabólico es mínima en comparación a la capacidad de generación de éste y determinar experimentalmente la radiación incidente y la temperatura en el foco del colector a lo largo del día.

Tomando en consideración los requerimientos de flexibilidad, robustez y economía, se selecciona un sistema de seguimiento altitud-azimut de tipo ecuatorial. Este sistema se diseña, se simula y se construye para seguir de forma autónoma al sol.

La radiación incidente sobre un foco de concentración de una superficie es calculada a través de un modelo genérico de reflexión de rayos en forma de conos provenientes desde el sol, los cuales forman una zona focal de diámetro dependiente de la calidad del material reflectante. Con este diámetro es posible calcular la capacidad de concentración del colector y la radiación incidente en él. Se construye un receptor para el foco, en el cual se puede medir la temperatura y estimar la radiación incidente, permitiendo su contraste con los valores teóricos.

Se encuentra que la energía necesaria para realizar el seguimiento solar no es superior a 20 [Wh] por día, lo cual no supera el 1 % de los 2500 [Wh-día] que un generador de 500 [W] nominales es capaz de generar.

Las curvas de temperatura y radiación determinadas experimentalmente en el receptor se ajustan a lo esperado teóricamente, por lo cual se cuenta con un modelo que puede predecir bajo cualquier condición el valor de estos parámetros. De esta forma, los resultados de este trabajo sirven de base para la propuesta de sistemas de concentradores solares para aplicaciones en GD.

Como trabajo futuro está la construcción en el colector de algún tipo de generación, ya sea un ciclo de vapor o un motor Stirling. También se recomienda implementar un control y monitoreo de tipo remoto, con el cual se pueda tener acceso a información del sistema a tiempo real y dar acciones de mando desde cualquier lugar con acceso a Internet.

Recent calculations indicate that the "Sun Will Go Out in a Billion Years As Its Fuel Runs Out" (Source: newspaper headline) As that calculation was made a year ago, we now have only nine-hundred ninety-nine million, nine-hundred ninety-nine thousand, nine-hundred and ninety-nine years left during which we could use solar energy. Wouldn't it be better to put our human resources and scientific brains to work to find a safer and more permanent solution to our energy needs?

D. Simanek, Lock Haven University

Agradecimientos

Quiero agradecer en primer lugar a mi papá Mingo, a mi mamá Caos y a mis hermanos Pablo, Martín y Ernesto por todo el apoyo incondicional y el cariño que me han entregado siempre y sin el cual no hubiera podido llegar hasta acá.

También expreso mi agradecimiento a todos mis amigos por su apoyo y buena onda y de manera especial a Bebina, con la cual hemos pasado 4 maravillosos años.

Mi gratitud a la ayuda y guía del profesor Rodrigo Palma, el cual siempre se mostró optimista, con ideas para aportar y me dio su apoyo en todo momento.

Igualmente a los profesores Luis Vargas y Carlos Gherardelli por sus valiosos aportes en el desarrollo de esta memoria.

Agradezco al estudiante de Ingeniería Mecánica Hugo Muñoz Opitz por su profesional trabajo en los cálculos mecánicos de la montura solar.

Incluyo en este reconocimiento a todo el personal de biblioteca por atenderme siempre de manera tan deferente y a Vladimir Ovalle por enseñarme a ocupar todos los equipos que tiene en el taller y ayudarme con la manufactura de la montura.

Expreso mi agradecimiento a la empresa CODELCO por becarme casi la totalidad de mis dos carreras, lo cual significó un fuerte respaldo para mis estudios.

Índice general

Índice General	I
Índice de Figuras	III
Índice de Tablas	VII
1. Introducción	1
1.1. Objetivos	2
1.1.1. Objetivos específicos	2
1.2. Estructura de la memoria	2
2. Antecedentes generales	3
2.1. Historia de la energía solar con colectores solares	3
2.1.1. Sistemas de colectores parabólicos desarrollados	4
2.2. Geometría solar	4
2.2.1. Definiciones geométricas terrestres	4
2.2.2. Definiciones generales	5
2.2.3. Definiciones para observador terrestre	6
2.3. Radiación solar	9
2.4. Colectores solares	11

2.4.1. Colectores no concentradores	11
2.4.2. Colectores concentradores	13
2.5. Seguimiento solar	16
2.6. Actuadores lineales	18
3. Desarrollo teórico	20
3.1. Propiedades radiativas	20
3.2. Colector paraboloide	21
3.2.1. Simulación mecánica	21
3.2.2. Simulación termodinámica	33
3.2.3. Análisis térmico en el receptor	38
4. Desarrollo experimental	41
4.1. Seguimiento solar	41
4.1.1. Construcción de la montura solar	41
4.1.2. Sistema de seguimiento solar	44
4.1.3. Mediciones experimentales en el seguimiento solar	47
4.2. Radiación incidente y temperatura en el foco	49
5. Análisis de resultados	53
5.1. Seguimiento solar	53
5.2. Radiación incidente y temperatura en el foco	56
6. Conclusiones	62
Bibliografía	64

Apéndices	66
A. Planos de piezas y ensamblajes de la montura solar	66
B. Programas realizados para simulación	67

Índice de figuras

2.1. Paralelos y meridianos	5
2.2. Ángulos para plano inclinado y posicionamiento solar [1]	7
2.3. Declinación solar en los solsticios [2]	7
2.4. Radiación solar fuera de la atmósfera	10
2.5. Colector plano [4]	12
2.6. Colector CPC [4]	13
2.7. Colector PTC [4]	14
2.8. Colector parabólico [4]	15
2.9. Helióstato [4]	16
2.10. Tipos de monturas para seguimiento en 2 ejes [10]	17
2.11. Esquema de actuador lineal electromecánico [17]	18
2.12. Limitador de movimiento [16]	19
3.1. Montura 1 para colector parabólico	22
3.2. Montura 2 para colector parabólico	22
3.3. Sistemas de referencia (x, y, z) y (u, v, w)	24
3.4. Ángulos β y ψ	25
3.5. Medidas en el colector	26
3.6. Modelo de receptor	27

3.7. Puntos de referencia en el colector	28
3.8. Fuerza ejercida por el actuador lineal de elevación en verano	30
3.9. Fuerza ejercida por el actuador lineal de azimut en verano	30
3.10. Largo del actuador lineal de elevación en verano	31
3.11. Largo del actuador lineal de azimut en verano	31
3.12. Rapidez del actuador lineal en función de la carga	32
3.13. Corriente consumida por el actuador lineal en función de la carga	32
3.14. Colector parabólico y vectores reflejados	34
3.15. Esquema de un cono incidente y un cono reflejado con ángulo de dispersión incluido	35
3.16. Foco formado por las elipses de intersección a distancia focal, radio focal 7 cm, $\delta = 1,5^\circ$	36
3.17. Foco formado por las elipses de intersección a 10 cm sobre la distancia focal, radio focal 15 cm, $\delta = 1,5^\circ$	37
3.18. Foco formado con colector desalineado en $\Delta\theta = \pi/24$ y $\Delta\gamma = \pi/24$	37
3.19. Dibujo conceptual del colector y receptores [14]	39
3.20. Receptores adecuados para uso en el colector [14]	39
3.21. Eficiencia del sistema colector-receptor en función de la temperatura del receptor	40
4.1. Base transportable del colector	41
4.2. Perfiles que soportan la estructura	42
4.3. Eje de giro en elevación	42
4.4. Eje de giro en azimut	43
4.5. Actuadores lineales colocados en la montura	43
4.6. Seguidor solar	44
4.7. Puente H	44

4.8. Circuito para elegir velocidad lenta o rápida [16]	45
4.9. Caja de fuerza y control, vista cerrada y abierta	46
4.10. Grupo de LED del seguidor en caja oscura de acrílico	46
4.11. Posición del sol entre el 4 y 7 de julio	47
4.12. Corriente consumida por el actuador de elevación en el seguimiento	48
4.13. Corriente consumida por el actuador de azimut en el seguimiento	48
4.14. Corriente consumida por el actuador de azimut en el reposicionamiento desde el ocaso hasta la posición de salida del sol	49
4.15. Receptor construído para el colector	49
4.16. Entrada de termocuplas K por la parte posterior del receptor	50
4.17. Radiación Solar el 6 de Junio	50
4.18. Radiación Solar el 30 de Julio	51
4.19. Temperatura medida en el receptor el 6 de Junio	51
4.20. Temperatura medida en el receptor el 30 de Julio	52
5.1. Montura Ecuatorial [13]	53
5.2. Corriente en actuador de azimut Teórica y Medida Experimentalmente . . .	54
5.3. Corriente en actuador de azimut Teórica y Medida Experimentalmente para un movimiento particular	54
5.4. Corriente en actuador de azimut teórica consumida el 21 de diciembre	55
5.5. Corriente en actuador de azimut teórica consumida en la vuelta del ocaso a la posición de amanecer el 21 de diciembre	56
5.6. Temperatura medida en el receptor el 6 de junio	57
5.7. Temperatura medida en el receptor el 30 de julio	57
5.8. Radiación incidente en el foco teórica y experimental para el 6 de junio . . .	58
5.9. Radiación incidente en el foco teórica y experimental para el 30 de julio . . .	58

5.10. Temperatura en el foco medida experimentalmente y ajustada teóricamente para el 6 de junio	59
5.11. Temperatura en el foco medida experimentalmente y ajustada teóricamente para el 30 de julio	60
5.12. Radiación incidente en el foco obtenida experimentalmente y ajustada teóri- camente para el 6 de junio	60
5.13. Radiación incidente en el foco obtenida experimentalmente y ajustada teóri- camente para el 30 de julio	61

Índice de cuadros

2.1. Colectores de energía solar	11
3.1. Reflectancia para diferentes materiales reflectantes	20
3.2. Tabla comparativa de monturas 1 y 2	23
4.1. Combinaciones de los interruptores de un puente H	45

Capítulo 1

Introducción

La eficiencia energética y la búsqueda de nuevas fuentes de energía han llevado a investigar aplicaciones de la energía solar para generación de energía Eléctrica.

Si se observan los mapas de radiación solar mundiales, se puede constatar que Chile es un lugar privilegiado en cantidad de energía recibida proveniente del sol, por lo cual nace la motivación de ocuparla con fines de generación.

Un colector solar, junto con un ciclo de vapor para generación o un motor Stirling, pueden ser alternativas válidas de implementación para generación distribuida, sobre todo en regiones de Chile donde existe una alta radiación solar.

La concentración de la radiación solar se hace necesaria cuando se desean obtener altas temperaturas, las cuales son una condición necesaria para el funcionamiento de los sistemas de generación descritos anteriormente.

Tener estudios teóricos y experimentales de un concentrador parabólico son esenciales previo a su implementación a gran escala.

Los sistemas de colectores solares parabólicos necesitan tener un sistema de seguimiento solar, el cual permite tener los rayos solares concentrados en su foco en todo momento. Dada la baja energía generada por cada colector (del orden de los 500[Wh]), es importante saber cuánta energía se ocupa en el seguimiento y en la electrónica asociada.

Para la implementación de un sistema de generación en el foco, es relevante conocer la radiación incidente en él y la temperatura a la que puede llegar.

Estos dos últimos puntos son los abarcados por la presente memoria.

1.1. Objetivos

En el contexto señalado esta memoria tiene dos objetivos principales:

- Probar que la energía ocupada para hacer el seguimiento solar del colector es mínima en comparación con la energía generada por éste.
- Encontrar, a través de simulaciones, la radiación incidente en el foco del colector y la temperatura que puede alcanzar éste y luego validar experimentalmente estos resultados.

1.1.1. Objetivos específicos

Los objetivos específicos de este trabajo son:

- Conocer la teoría sobre la radiación solar y los sistemas de seguimiento solar.
- Desarrollo de una montura solar acorde con los requerimientos.
- Programar simulaciones que den una base teórica a las mediciones experimentales.
- Dar soluciones, tanto estructurales como electrónicas, robustas y a la vez económicamente viables.

1.2. Estructura de la memoria

En el capítulo 2 se da una reseña histórica del uso de la energía solar en generación de energía eléctrica y del uso de colectores solares. También se detallan conocimientos generales que se deben tener para entender cualquier aplicación solar, como posicionamiento terrestre, definición de ángulos solares y radiación solar. Luego se da una mirada global a los tipos de concentradores solares existentes en la actualidad y a los tipos de seguimiento solar existentes.

En el capítulo 3 se explican los desarrollos teóricos que llevan a elegir una montura adecuada para esta aplicación, se estima la energía ocupada para que esta montura siga al sol y la temperatura y radiación solar incidente en el foco del colector.

En el capítulo 4 se explica como se construye la montura solar, así como las mediciones que se realizarán para medir la energía ocupada en el seguimiento solar. También se entregan los resultados experimentales de medición de temperatura y radiación incidente en el foco.

En el capítulo 5 se hace un paralelo de comparación teórico-experimental en cuanto a seguimiento solar y temperatura en el foco y se analizan los resultados obtenidos.

En el capítulo 6 se concluye sobre los resultados obtenidos y se exponen trabajos futuros.

Capítulo 2

Antecedentes generales

2.1. Historia de la energía solar con colectores solares

La idea de utilizar colectores solares para aprovechar la energía del sol es antigua. En el 212 AC el científico griego Arquímedes desarrolló un método para quemar las naves romanas en el mar. Éste consistía en construir un gran espejo cóncavo con cientos de escudos pulidos y concentrar los rayos reflejados en cada nave.

Sorprendentemente, las primeras aplicaciones realizadas con energía solar ocuparon concentradores solares, los cuales por su naturaleza de construcción y necesidad de seguir el sol, eran más difíciles de ocupar. Durante el siglo 18, fueron construidos hornos solares capaces de fundir acero, cobre y otros metales. Su uso fue extendido en Europa y el Medio Oriente, destacándose un horno diseñado por el científico francés Antoine Lavoisier que alcanzó la temperatura de 1750 °C [4].

Durante el siglo 19, August Monchot construyó y operó motores a vapor generado por energía solar entre los años 1864 y 1878, además diseñó un colector con forma de cono truncado. Abel Pifre, contemporáneo de Monchot, diseñó un colector solar parabólico conformado por espejos pequeños.

En el año 1901, A.G Eneas instaló un colector parabólico de 10 metros de diámetro, el cual generaba vapor en su foco y alimentaba un sistema de bombeo de agua en California [4].

En 1912 Shuman, en colaboración con C.V. Boys, construyó el mayor sistema de bombeo solar en el mundo hasta el momento. El sistema fue puesto en operación en 1913 y se ocuparon colectores cilindro-parabólicos, los cuales focalizaban la energía del sol en un tubo de absorción. Cada colector medía 62 metros de largo y formaban un área total de colección de 1200 m². Con este sistema se generaban 40 kW.

Entre los años 1915 al 1950, el interés por el uso de energía solar en generación decayó; esto debido a los avances en motores de combustión interna y a los bajos precios de los combustibles fósiles.

Sin embargo, después del uso de celdas solares en los programas espaciales y a los crecientes precios de los combustibles, la energía solar ha vuelto a ser una alternativa válida de generación eléctrica.

Durante los últimos 50 años, muchas mejoras a estos sistemas fueron ideadas y construídas; en general, todas transfieren calor en el foco a un fluido de trabajo el cual alimenta un sistema mecánico.

Actualmente, dos disposiciones de colectores se encuentran ampliamente difundidas.

La primera posee un receptor central y es llamada helióstato. En ésta un campo de espejos refleja la radiación solar a un receptor situado sobre una torre.

La segunda ocupa concentradores distribuidos, cada concentrador con su receptor en el foco. Entre estos se encuentran concentradores parabólicos, Fresnel y cilindro-parabólicos. Los concentradores parabólicos pueden realizar un seguimiento solar en dos ejes, mientras que los cilindro-parabólicos sólo en uno.

2.1.1. Sistemas de colectores parabólicos desarrollados

En los últimos 30 años ha habido variados intentos por utilizar de manera eficiente los colectores parabólicos para generar energía eléctrica.

Advaco Corporation produjo un disco parabólico de 11 metros de diámetro, el cual ocupaba un motor Stirling en su foco para generar electricidad. El conjunto disco-motor tuvo el record histórico en eficiencia de conversión de energía solar en eléctrica, el cual fue de 31 %. Sin embargo, el proyecto fue cerrado debido a los altos costos del colector y de mantenimiento.

Otra conocida planta solar existía en Shenandoah, Georgia. Esta planta contaba con 114 colectores parabólicos, los cuales totalizaban un área de colección de 4352 m^2 . Fue diseñada para generar 450 kW y su eficiencia final fue de 17 %. Debido a sus altos costos de instalación y mantenimiento, el proyecto fue concluído en 1990.

Sandia National Laboratories en EEUU y Almeria en España son dos centros de investigación donde se pueden encontrar aplicaciones experimentales del conjunto disco parabólico-Motor Stirling, sin embargo, no se le ha dado un uso comercial aún [4].

En el campo de los colectores cilindro-parabólicos, la empresa MAN Solar Millennium GmbH es la empresa líder a nivel mundial en la instalación de centrales termoeléctricas con este tipo de colectores. Las potencias nominales de estas centrales oscilan entre los 20 y 250 [MW].

2.2. Geometría solar

2.2.1. Definiciones geométricas terrestres

La tierra se divide en paralelos de latitud como se observa en la figura 2.1. En el hemisferio norte se considerará la latitud positiva y varía entre 0° y 90° , en el hemisferio sur se considera negativa y varía entre 0° y -90° . El paralelo de 0° se le llama ecuador terrestre. El símbolo que se utilizará para la latitud será ϕ .

La tierra también se divide en meridianos de longitud como se observa en la figura 2.1. Se usa como meridiano 0° el que pasa por Greenwich, Inglaterra. Hacia el este y el oeste los meridianos aumentan de 0° a 180° .

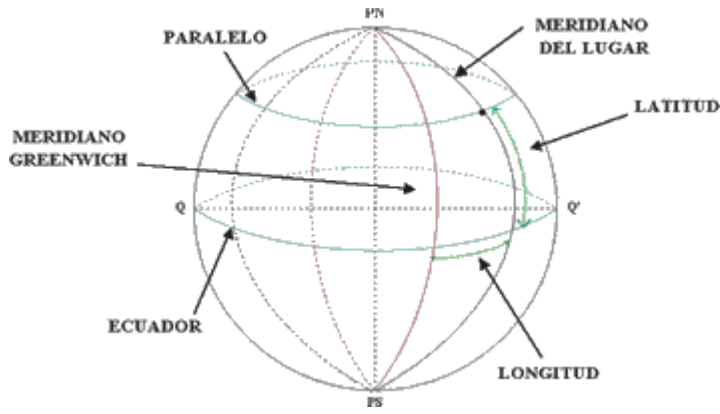


Figura 2.1: Paralelos y meridianos

2.2.2. Definiciones generales

A continuación se entrega una lista de definiciones utilizadas en el trabajo:

Zenit: Es la línea perpendicular al plano horizontal en el punto del observador.

Masa de Aire (m): Es la razón entre el grosor óptico de la atmósfera que debe atravesar el haz de luz en un momento dado con respecto al grosor óptico si el sol estuviera en el zenit. Por lo anterior, $m = 1$ cuando el sol está en el zenit. Para un ángulo zenit θ dado (ver punto capítulo 2.2.3) y una altura local (m.s.n.m) de h , se cumple que

$$m(\theta, h) = \left(\frac{1}{\cos(\theta)} + 0,15(3,885 + \theta)^{-1,253} \right) e^{-0,0001184h} \quad (2.1)$$

Radiación Directa: Es la radiación solar recibida directamente desde el sol, sin sufrir scattering en la atmósfera o reflexión en objetos cercanos. Tiene unidades de W/m^2 .

Radiación Difusa: Es la radiación solar recibida desde el sol después que su dirección ha sido cambiada por scattering en la atmósfera o por reflexión en objetos cercanos. Tiene unidades de W/m^2 .

Radiación Total: Corresponde a la suma de la radiación directa y la radiación difusa.

2.2.3. Definiciones para observador terrestre

Las relaciones geométricas entre un plano de orientación arbitraria y la radiación directa incidente (o sea, la posición relativa entre el sol y el plano) pueden ser descritas en términos de ángulos [1]. Estos ángulos son los siguientes (como ayuda usar la figura 2.2):

Ángulo zenit (θ): Es el ángulo subtendido entre la línea zenith y la línea de vista del sol.

Latitud (ϕ): La posición angular con respecto al Ecuador. $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$.

Declinación (δ): La posición angular del sol a mediodía con respecto al plano del Ecuador. El norte es positivo. $-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$.

Inclinación (β): El ángulo entre la superficie de interés y el plano horizontal. $0 \leq \beta \leq 180^\circ$.

Ángulo de azimuth del sol (γ_s): Es el ángulo formado por la proyección en el plano horizontal del rayo solar. Este ángulo tiene valor cero cuando la proyección apunta al norte, valor positivo cuando apunta hacia el oeste y valor negativo cuando apunta al este. $-180^\circ \leq \gamma_s \leq 180^\circ$.

Ángulo de azimuth de la superficie (γ): Es el ángulo de desviación de la proyección en el plano horizontal de la normal a la superficie con respecto al meridiano local. Este ángulo tiene valor cero cuando la proyección apunta al norte, valor positivo cuando apunta hacia el oeste y valor negativo cuando apunta al este. $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$.

Ángulo de hora solar (ω): Es el desplazamiento angular Este u Oeste del sol con respecto al meridiano local debido a la rotación de la tierra en su eje a 15° por hora. Se toma como referencia ($\omega = 0$) el mediodía, y se calcula como $15 \cdot N^\circ$ horas a mediodía. En la mañana este ángulo es negativo y en la tarde, positivo.

Ángulo de incidencia (θ_i): Es el ángulo entre el haz de radiación directa en una superficie y la normal a esa superficie.

Los ángulos de zenit, inclinación, azimuth solar y azimuth de la superficie se pueden observar en la figura 2.2:

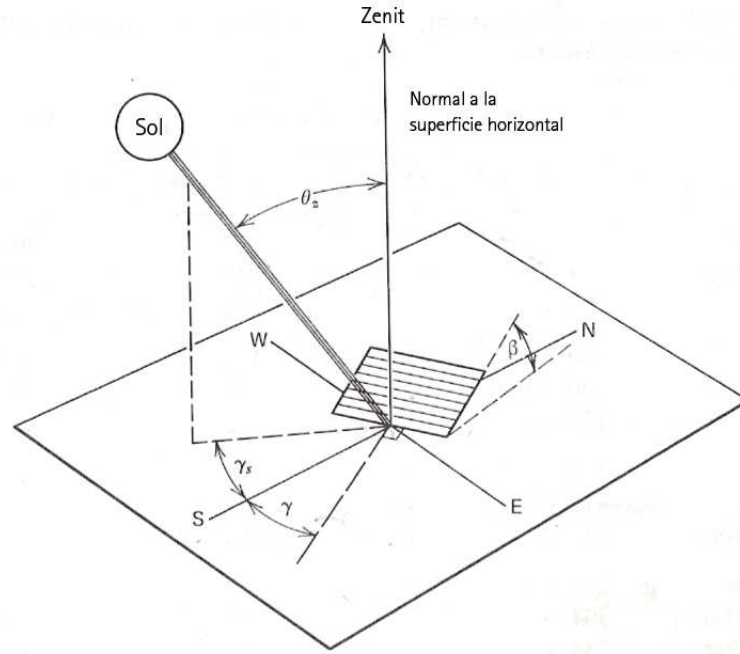


Figura 2.2: Ángulos para plano inclinado y posicionamiento solar [1]

La declinación δ [°] puede ser descrita por la ecuación de Cooper (1969)

$$\delta = 23,45 \sin \left(360 \frac{284 + n}{365} \right) \quad (2.2)$$

donde n es el día Juliano del año. Este ángulo se mide para un sistema de referencia en el centro de la tierra y con el eje z en el eje Norte Sur de la tierra. Debido a la inclinación propia de la tierra ($23^{\circ}27'$), este ángulo tiene un valor igual a $23^{\circ}27'$ en el solsticio de invierno y $-23^{\circ}27'$ en el solsticio de verano (solsticios referidos al hemisferio sur) como se observa en la figura 2.3

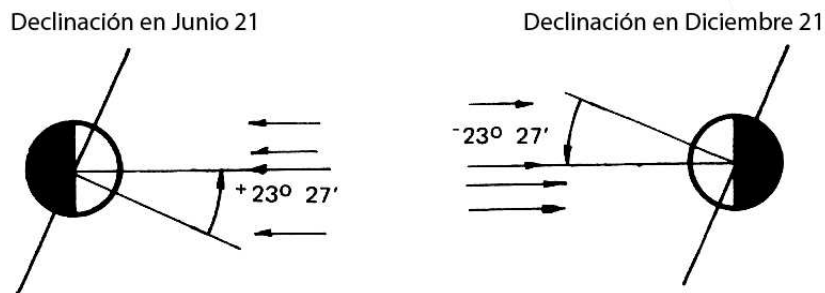


Figura 2.3: Declinación solar en los solsticios [2]

La ecuación que relaciona el ángulo de incidencia del haz de radiación directa, θ_i , y los otros ángulos es [1, 2]

$$\begin{aligned}\cos(\theta_i) = & \sin(\delta) \sin(\phi) \cos(\beta) - \sin(\delta) \cos(\phi) \sin(\beta) \cos(\gamma) + \cos(\delta) \cos(\phi) \cos(\beta) \cos(\omega) + \\ & + \cos(\delta) \sin(\phi) \sin(\beta) \cos(\gamma) \cos(\omega) + \cos(\delta) \sin(\beta) \sin(\gamma) \sin(\omega)\end{aligned}\quad (2.3)$$

Para superficies horizontales, $\beta = 0^\circ$, el ángulo de incidencia es igual al ángulo de zenit del sol, θ , el cual puede calcularse como

$$\cos(\theta) = \cos(\delta) \cos(\phi) \cos(\omega) + \sin(\delta) \sin(\phi) \quad (2.4)$$

El ángulo de azimut del sol (γ_s) puede ser calculado como

$$\sin(\gamma_s) = \frac{\cos(\delta) \sin(\omega)}{\sin(\theta_z)} \quad (2.5)$$

Tiempo Solar: En el cálculo que se realiza para obtener el ángulo ω se ocupa el tiempo solar, para el cual el medio día ocurre cuando el sol cruza el meridiano local. Sin embargo esta medida no coincide necesariamente con el tiempo local del observador. Por lo anterior es necesario efectuar tres correcciones: primero, existe una corrección por la diferencia en longitud entre el meridiano local del observador y el meridiano sobre el cual está basada la hora local; para esto se debe saber que el sol toma 4 minutos en recorrer 1° de longitud. Segundo, en nuestro país se efectúa un cambio de hora en verano para obtener un mejor aprovechamiento de la luz solar y por lo tanto un ahorro de energía. Tercero, es necesario considerar que aunque la tierra gira exactamente sobre su eje una vuelta en 24 horas, sufre varias perturbaciones en su recorrido a través del sol. Por lo tanto [2]

$$h_s = h_l[hr] - X[hr] + E[min] + 4(m_{con} - m_{loc})[min] \quad (2.6)$$

Siendo

- h_s : Hora solar
- h_l : Hora local
- $X = 1$, en verano y sólo si hay cambio de hora.
- $X = 0$, en invierno o si no hay cambio de hora en verano.
- E : ecuación del tiempo, en minutos, según ecuación 2.7.

- m_{con} : meridiano convencional en grados medidos al Oeste de Greenwich
- m_{loc} : meridiano local, en grados, medidos al Oeste de Greenwich

Para Chile MCON = 60° Oeste. MLOC= 70° Oeste aprox., depende del lugar.
La ecuación del tiempo E se puede calcular como [1, 2]

$$E = 9,87 \sin(2B) - 7,53 \cos(B) - 1,5 \sin(B) \quad (2.7)$$

donde

$$B = \frac{360(n - 81)}{364} \quad (2.8)$$

2.3. Radiación solar

El sol es considerado una esfera de $13,9 \cdot 10^5$ [Km] de diámetro. La superficie del sol es aproximadamente equivalente a un cuerpo negro con una temperatura de 6000 [K] y emite $4,46 \cdot 10^{23}$ [kWh] de energía radiante.

La radiación solar medida fuera de la atmósfera en un plano perpendicular a la radiación incidente y a distancia media al sol se le denomina constante solar (I_o) y es igual a 1353 [W/m^2].

Como la órbita de la tierra es elíptica, la radiación que incide fuera de la atmósfera varía en el año; siendo su valor máximo I_o . Esta relación se puede escribir como [1]

$$I(n) = I_o \left[1 + 0,034 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right] \quad (2.9)$$

donde n es el día Juliano. El gráfico de esta relación se puede ver a continuación:

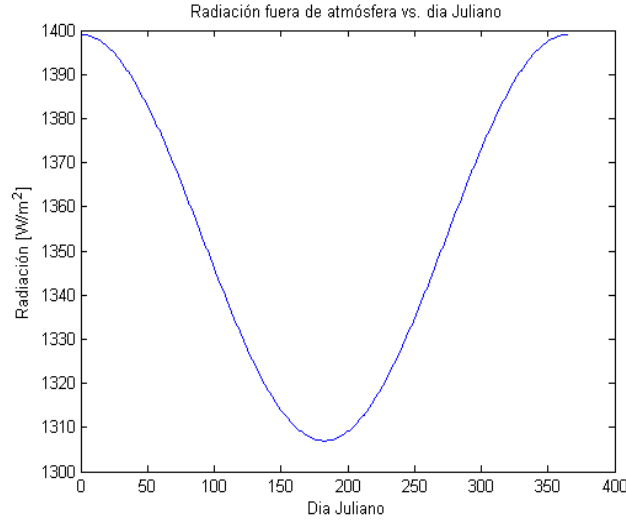


Figura 2.4: Radiación solar fuera de la atmósfera

Parte de esta radiación incidente es reflejada por la atmósfera de vuelta al espacio, es absorbida por la humedad presente en el aire o es dispersada por las nubes o por objetos en su paso. La radiación que alcanza directamente la tierra se conoce como radiación directa y la radiación dispersa, como radiación difusa (ver punto 2.2.2).

La radiación solar directa para un día n del año y un momento dado del día (θ) viene dada por [13]

$$I_d(n, \theta, h) = I(n)m(\theta, h) \quad (2.10)$$

donde $m(\theta, h)$ fue definido en la ecuación 2.1.

Es importante notar que la ecuación 2.10 modela la radiación directa para un día despejado con condiciones ideales y no toma en cuenta la meteorología local, el nivel de humedad en el aire y la contaminación atmosférica, los cuales son factores preponderantes en el nivel de radiación directa incidente. Siempre lo mejor es medir con un piranómetro la radiación incidente local.

La radiación directa y difusa en Chile se ha medido durante años y se encuentra tabulada [2][6]. En Calama en el mes de Noviembre se pueden encontrar $1042 [W/m^2]$ de radiación total sobre una superficie horizontal, de los cuales el 8 % corresponde a radiación difusa. En el mes de Junio se pueden encontrar $750 [W/m^2]$ de radiación total sobre una superficie horizontal, de los cuales el 10 % corresponde a radiación difusa. En Santiago en el mes de Noviembre se pueden encontrar $735 [W/m^2]$ de radiación total sobre una superficie horizontal, de los cuales el 10 % corresponde a radiación difusa. En el mes de Junio se pueden encontrar $350 [W/m^2]$ de radiación total sobre una superficie horizontal, de los cuales el 20 % corresponde a radiación difusa. Este contraste nos muestra la alta radiación existente en el norte del país, además de su poca variabilidad a lo largo del año.

2.4. Colectores solares

Existen básicamente dos tipos de colectores solares: los que no concentran una imagen o estacionarios y los que concentran una imagen. Un colector que no concentra imagen tiene usualmente un área de absorción (también llamada área de la imagen o área de zona focal) cercana al área de intercepción, mientras que un colector concentrador de imagen usualmente tiene una superficie reflectante cóncava y focaliza la radiación incidente en un área pequeña, incrementando el flujo radiativo.

La razón entre el área de intercepción (A_{ac}) y el área de absorción (A_f) es conocida como razón de concentración (CR) de un colector y es una propiedad relevante e intrínseca de cada uno de ellos. Puede ser definida como

$$CR = \frac{A_{ac}}{A_f} \quad (2.11)$$

Una lista de los colectores que se pueden encontrar actualmente en el mercado es la siguiente:

Cuadro 2.1: Colectores de energía solar

Seguimiento	Tipo de colector	Tipo de absorbente	CR (*)	Rango de temp. (°C)
Estacionario	Plano (FPC)	Plano	1	30-80
	Tubo evacuado (ETC)	Plano	1	50-200
	Parabólico compuesto (CPC)	Tubular	1-5	60-240
En un eje	Reflectores Fresnel (LFR)	Tubular	10-40	60-250
	Cilindro parabólico (PTC)	Tubular	15-45	60-300
	Cilíndrico (CTC)	Tubular	10-50	60-300
En dos ejes	Disco parabólico (PDR)	Focal	100-1000	100-500
	Helióstato (HFC)	Focal	100-1500	150-2000

(*) CR=Concentration Ratio

2.4.1. Colectores no concentradores

Dos tipos de colectores caen en esta categoría:

- Colectores Planos (FPC)
- Colectores parabólicos compuestos (CPC)

Colectores planos: Un colector plano típico es mostrado en la figura 2.5 . Cuando la radiación solar pasa a través del vidrio cobertor e incide sobre la superficie absorbente, una gran cantidad de esta energía es transferida directamente al líquido dentro de los tubos (comunmente agua), y éste es luego almacenado u ocupado. Las zonas posteriores y laterales del colector deben estar muy bien aisladas del medio externo para reducir las pérdidas por conducción. Los tubos están unidos entre ellos en ambos extremos por tubos de mayor diámetro.

El vidrio cobertor es muy importante ya que aísla a la superficie de absorción del medio ambiente, reduciendo las pérdidas por convección. Este vidrio también es transparente a longitudes de onda corta provenientes desde el sol, pero es opaco a las longitudes de onda larga emitidas por la superficie de absorción; con lo cual disminuye al mínimo las pérdidas por radiación.

Este tipo de colectores está usualmente fijo y no necesita seguir al sol. Para obtener una mayor eficiencia, los colectores deben estar mirando en dirección norte e inclinados en un ángulo igual a la latitud del lugar (puede variarse el ángulo según la estación del año) [4].

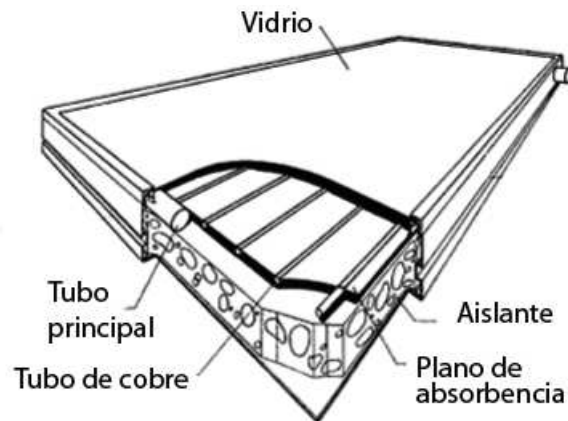


Figura 2.5: Colector plano [4]

Colectores parabólicos compuestos: Estos colectores tienen la capacidad de reflejar al foco lineal toda la radiación incidente que captan. Usando múltiples reflexiones internas, cualquier radiación solar que entre al colector dentro de su ángulo de aceptación (θ_c), llega a la superficie absorbente que está en el fondo del colector (ver figura 2.6).

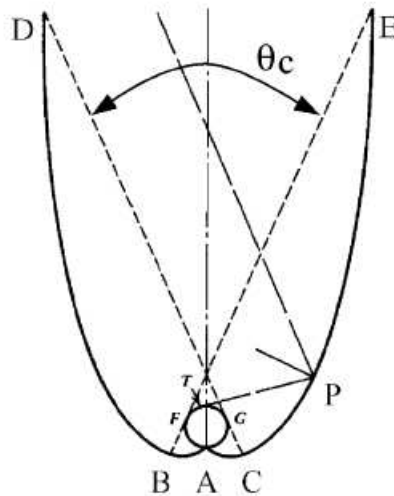


Figura 2.6: Colector CPC [4]

2.4.2. Colectores concentradores

Los colectores concentradores presentan ciertas ventajas con respecto a los concentradores planos convencionales (FPC) [4]. Las principales son:

1. El fluido de trabajo llega a temperaturas mayores en un colector concentrador, tomando la misma superficie de colector en ambos. Esto significa que se puede lograr una mayor eficiencia termodinámica.
2. Dado que la superficie absorbente es pequeña (con respecto al área total del colector), ocupar superficies de absorción selectivas y ocupar zonas de vacío en ésta para disminuir pérdidas (y por lo tanto la eficiencia del colector) son alternativas económicamente viables.

También ofrecen desventajas comparativas [4]. Las principales son:

1. Los colectores concentradores sólo utilizan la radiación directa y no la difusa.
2. Es necesario implementar un sistema de seguimiento solar con los colectores.
3. El reflectante del colector puede perder sus propiedades con el tiempo y requiere mantenimiento periódica.

Los colectores que entran en esta categoría son:

1. Colectores cilindro parabólicos (PTC)
2. Disco parabólico (PDR)
3. Helióstato

Colectores cilindro parabólicos: Una característica importante de estos colectores es que pueden lograr temperaturas hasta los 400 °C con una buena eficiencia termodinámica. Tienen aplicaciones tanto en generación de energía eléctrica como en calentamiento de agua, pudiendo para esta última aplicación ser contruidos con materiales ligeros y baratos, lo cual disminuye el costo de inversión inicial y facilita el seguimiento solar. Estos colectores se contruyen doblando una lámina de material reflectante con forma parabólica. Un tubo metálico de color negro, recubierto con un tubo de vidrio para disminuir las pérdidas de calor, se debe colocar a lo largo de la línea focal como receptor (ver figura 2.7).

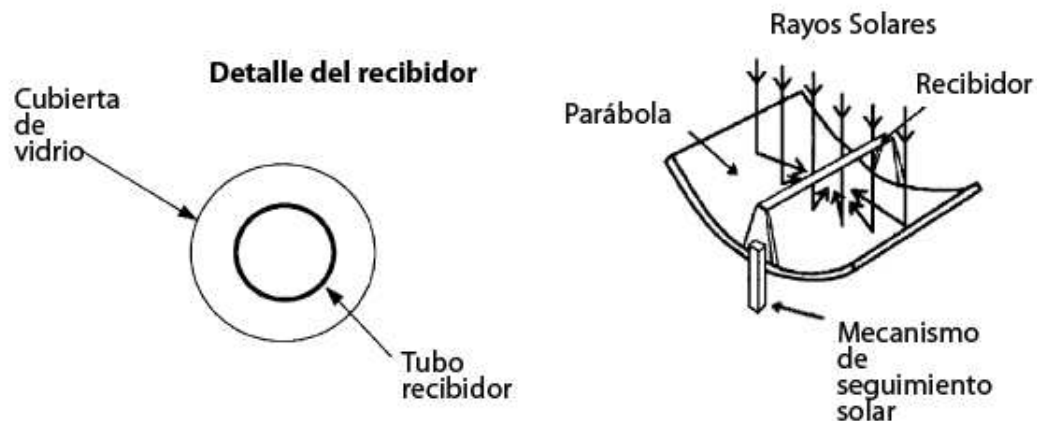


Figura 2.7: Colector PTC [4]

Cuando la parábola es orientada hacia el sol, los rayos paralelos incidentes en el colector son reflejados hacia el foco lineal. Es suficiente hacer seguimiento solar en un solo eje de rotación. Este tipo de colectores no se ocupa, la mayoría de las veces, en forma individual, sino que en forma grupal y estando los tubos receptores conectados entre ellos. Este tipo de tecnología es la más avanzada dentro de las tecnologías solares, debido a la gran experimentación que se ha realizado con ellos y a la formación de un pequeño nicho de industrias que contruyen y venden estos colectores.

Las mayores instalaciones de este tipo de sistemas se encuentran en el sur de California (SEGS) [4], donde gracias al uso de turbinas a vapor se cuenta con una capacidad instalada de 354 MW de generación eléctrica, y en la Plataforma Solar de Almeria (PSA) [4] en el sur de España donde principalmente se tiene con fines experimentales una capacidad instalada de 1,2 MW de generación eléctrica.

Disco Parabólico: Esquemáticamente, un colector parabólico se puede representar como en la figura 2.8 . Cuando este colector enfrenta al sol, la radiación incidente se concentra en su foco. Por lo anterior, debe seguir al sol en sus dos grados de libertad (altitud y azimut).

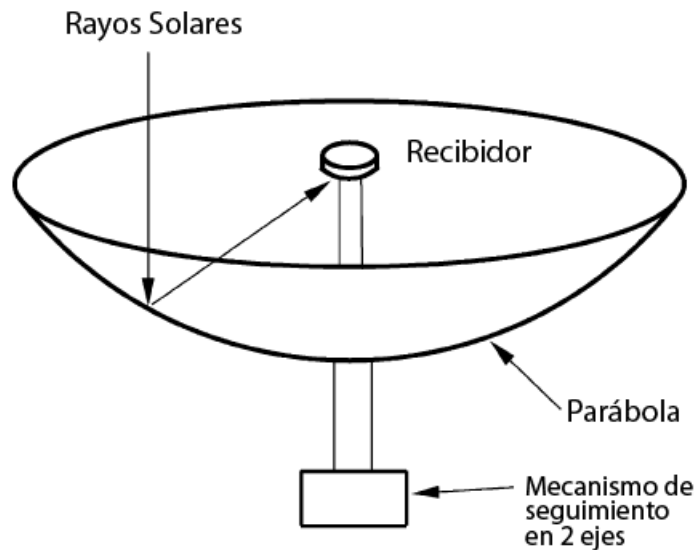


Figura 2.8: Colector parabólico [4]

El receptor colocado en el foco, absorbe la radiación solar y la traspassa en forma de calor a un fluido circulante. La energía calórica presente en el fluido puede ser convertida a electricidad mediante el uso de un motor-generador dispuesto en el foco o puede ser transportada a través de cañerías a un receptor central y servir para diversos propósitos. La temperatura en el receptor puede sobrepasar los 1500 °C.

Los colectores parabólicos tienen ventajas importantes con respecto a otros colectores [4]:

1. Debido a que siempre están apuntando al sol, son el sistema de concentración solar más eficiente.
2. Tienen concentraciones entre 600-2000.
3. El colector como módulo se puede ocupar de manera independiente o ser parte de un campo de colectores.

Helióstato: Para obtener altos niveles de radiación de energía solar, es necesario disponer de varios espejos planos dispuestos en un campo con seguimiento solar de altitud-azimut y reflejando la radiación incidente en cada uno de ellos a un foco receptor común, como se observa en la figura 2.9 .

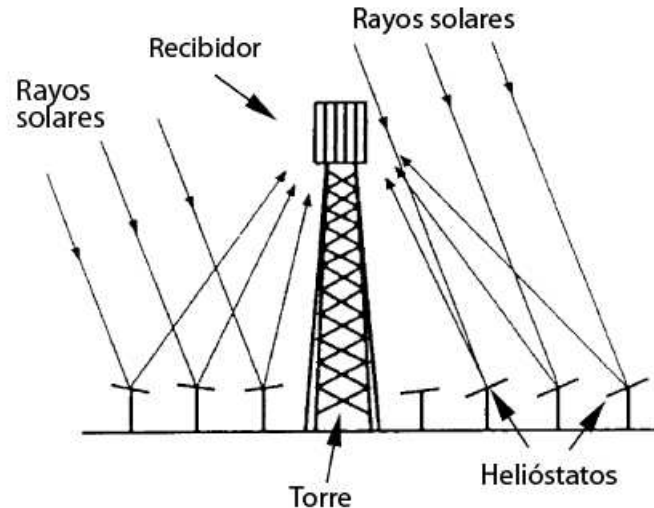


Figura 2.9: Helióstato [4]

Generalmente, en el receptor se genera vapor de agua a alta presión y temperatura. Esta agua se lleva mediante cañerías a un receptor central donde se puede almacenar y ocupar para generar energía eléctrica.

Se pueden obtener concentraciones entre 300 y 1500, teniendo el foco un flujo radiativo entre 200 y 1000 [kW/m^2], obteniéndose temperaturas por sobre los 1500 °C.

2.5. Seguimiento solar

Con el fin de maximizar la energía solar que llega al receptor, un sistema de seguimiento solar debe ser desarrollado. En un colector parabólico es muy importante, ya que los rayos que inciden de manera paralela a la línea focal inciden en el foco y por lo tanto es necesario estar apuntando al sol en todo momento.

Un sistema de seguimiento debe ser confiable, capaz de seguir al sol con un cierto nivel de certeza (la certeza depende de la aplicación que se requiera), capaz de regresar al colector de su posición en el ocaso a su posición de espera del sol en el amanecer y también capaz de seguir al sol aún cuando haya existencia de nubes en forma intermitente.

Adicionalmente, el sistema de seguimiento también puede ser usado para proteger al colector ante la presencia de condiciones adversas de trabajo, como ráfagas de viento intensas, sobrecalentamiento del motor Stirling o falla en el flujo del fluido de enfriamiento.

Varias formas de seguimiento solar han sido desarrolladas, pasando de las monturas Ecuatoriales hasta el seguimiento alt-azimutal. Actualmente, debido al desarrollo de la electrónica, el seguimiento alt-azimutal es el más utilizado. En este tipo de seguimiento, se utilizan dos motores (un motor por eje de giro) los cuales son controlados electrónicamente a través de sensores (por ejemplo fotodiodos) que detectan la radiación solar incidente. Cuando la radiación sobre un sensor disminuye, entonces se da la orden de giro en el eje correspondiente [8].

El diseño de la montura solar que soporta a los motores, al sistema electrónico, al motor Stirling y al colector es importante. Existe en la literatura y en la red de Internet una variedad de diseños y muestras de monturas solares [9, 10]. En la figura 2.10 se pueden ver las monturas más ocupadas para seguimientos en dos ejes.

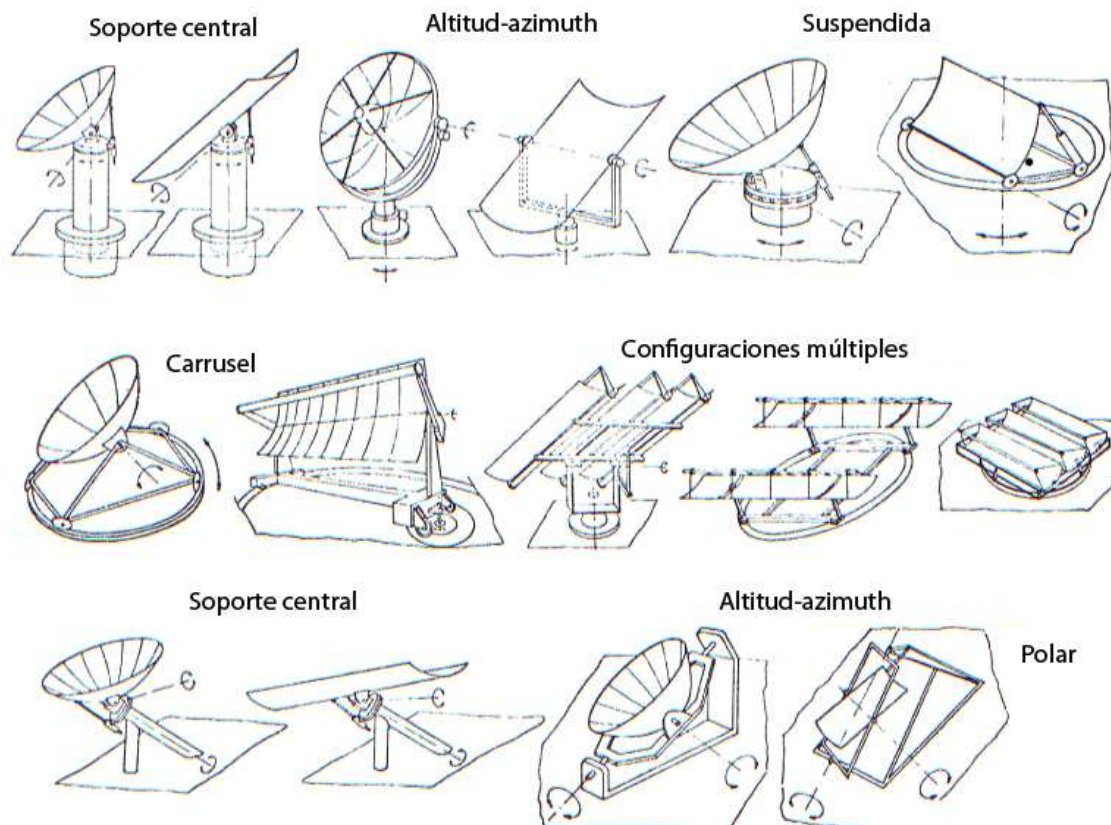


Figura 2.10: Tipos de monturas para seguimiento en 2 ejes [10]

Las velocidades medias de desplazamiento del sol promedian los $15^\circ/\text{hora}$. En Santiago, la velocidad de giro en azimut puede tener un máximo de $80^\circ/\text{hora}$ en el medio día del solsticio de verano, pero esta velocidad sólo dura algunos minutos. Dada esta baja velocidad de desplazamiento, los sistemas de seguimiento no requieren de motores con alta potencia, sino con alto torque; los cuales sean capaces de sacar al sistema de la inercia y hacer giros del sistema en torno a los 5° . Una manera de limitar este torque, que puede llegar a ser muy alto, es balancear el sistema con el uso de un contrapeso [10]. Un sistema razonablemente balanceado debería ocupar motores con potencias del orden de decenas de Watts.

Es deseable que el sistema de seguimiento tenga dos velocidades: una velocidad lenta para seguir el sol y una velocidad rápida para hacer mantenciones y para volver en la noche a su posición de amanecer.

2.6. Actuadores lineales

Un actuador lineal es un dispositivo que, teniendo una fuente de energía, desarrolla una fuerza y movimiento de manera lineal.

Existen varias formas de lograr este movimiento, o sea, el actuador puede ser mecánico, hidráulico o electromecánico. La aplicación más conocida son los alzavidrios de los automóviles o los brazos hidráulicos utilizados para abrir los portones de los pasajes.

Un actuador lineal electromecánico es un artefacto que convierte el movimiento de rotación de un motor en un movimiento lineal de un brazo o actuador. Dependiendo del giro del motor, el brazo se acorta o se alarga.

Como se ve en la figura 2.11 [17], un actuador electromecánico cuenta con un motor (el cual puede ser DC o AC), el cual está conectado a través de una correa con un tornillo sin fin. Las poleas que realizan esta conexión tienen una diferencia de radio considerable, lo cual aumenta el torque y disminuye la velocidad del tornillo.

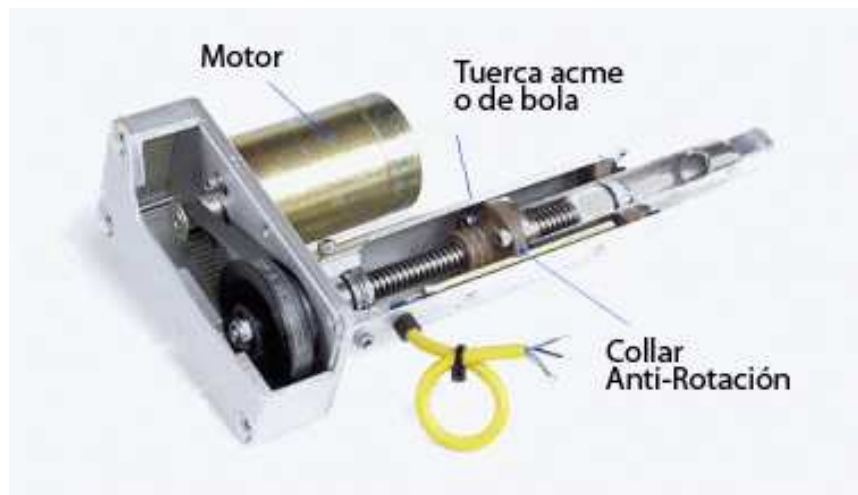


Figura 2.11: Esquema de actuador lineal electromecánico [17]

Para que el brazo no gire solidario al tornillo, se coloca un collar que fija el brazo con la superficie exterior, permitiéndole solamente un movimiento lineal.

Los actuadores electromecánicos encontrados en el mercado pueden tener altas velocidades y baja fuerza, altas fuerzas y bajas velocidades o un compromiso medio entre ambas. Su elección depende de la aplicación en que se quieran ocupar.

Para aplicaciones donde el actuador lineal funcione conectado a un sistema de seguimiento, es esencial que cuente con limitadores de movimiento (en inglés *limit switches*) los cuales definen los límites en distancia que se puede mover el brazo. La figura 2.12 sirve como guía para entender el funcionamiento de estos dispositivos.

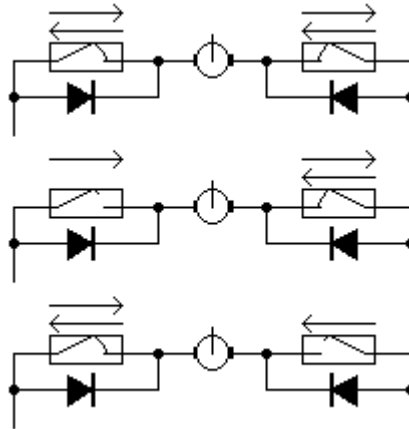


Figura 2.12: Limitador de movimiento [16]

En el primer esquema el motor funciona de manera normal en un intervalo entre los limitadores de movimiento. En el segundo esquema, el limitador de movimiento izquierdo se ha accionado, impidiendo el giro del motor en un sentido y permitiendo a través del diodo solo el giro contrario. El tercer esquema es análogo al segundo invirtiendo los giros.

Los limitadores de movimiento deben actuar antes de que el límite mecánico haya sido alcanzado, sino se generan corrientes elevadas que pueden dañar el sistema electrónico de seguimiento.

Capítulo 3

Desarrollo teórico

3.1. Propiedades radiativas

Cuando un cuerpo es expuesto a algún tipo de radiación, parte de esta radiación es absorbida, otra parte es reflejada y otra parte es transmitida (si el cuerpo no es opaco). La fracción de la radiación incidente que es reflectada viene definida por la reflexibilidad del material, ρ ; la fracción absorbida viene definida por la absorbencia del material, α_B y la fracción transmitida viene definida por la transmisividad del material, τ [2]. Cuando la radiación es solar, existen dos tipos de reflexiones: especular y difusa [1]. La reflexión es especular cuando el ángulo de incidencia es igual al ángulo reflejado y es difusa cuando la reflexión ocurre uniformemente distribuida en todas las direcciones. En superficies reflectoras reales ocurren reflexiones de los dos tipos, siendo en superficies pulidas prominente la especular y en superficies rugosas, la difusa.

Para un colector solar, es importante que el material reflectante del concentrador tenga una reflexión altamente especular. También es importante que la superficie en el receptor sea altamente selectiva, esto es que tenga una alta absorbencia a la radiación solar y una baja emitancia en el rango de temperaturas que se desea trabajar.

Las superficies reflectantes son usualmente placas de metal altamente pulidas o sustratos con recubrimientos metálicos. Algunas de estas superficies se muestran en el cuadro 3.1 con sus valores de reflectancia [5].

Cuadro 3.1: Reflectancia para diferentes materiales reflectantes

Material	Reflexibilidad (ρ)
Cobre	0,75
Mylar Tipo-C aluminizado	0,76
Oro	0,76
Rango para superficies aluminizadas varias	0,82 – 0,92
Aluminio anodizado	0.82

3.2. Colector paraboloide

Como ya se vio en el capítulo anterior, el colector es una parte relevante de todo sistema de concentración solar.

Antes de comenzar la implementación experimental del sistema es importante tener una simulación teórica de éste, tanto del punto de vista mecánico como radiativo.

3.2.1. Simulación mecánica

Este tipo de simulación se separa en dos partes. En la primera parte se busca una montura solar apropiada para la aplicación desde un punto de vista funcional y económico, y en la segunda parte se simula el comportamiento del sistema desde un punto de vista físico, calculando la energía ocupada en realizar el tracking.

Elección de la montura solar

Las monturas mostradas en la figura 2.10 sirvieron como motivación para desarrollar monturas funcionales y con un nivel medio o bajo de dificultad de construcción. Las dos monturas estudiadas se pueden ver en las figuras 3.1 y 3.2.

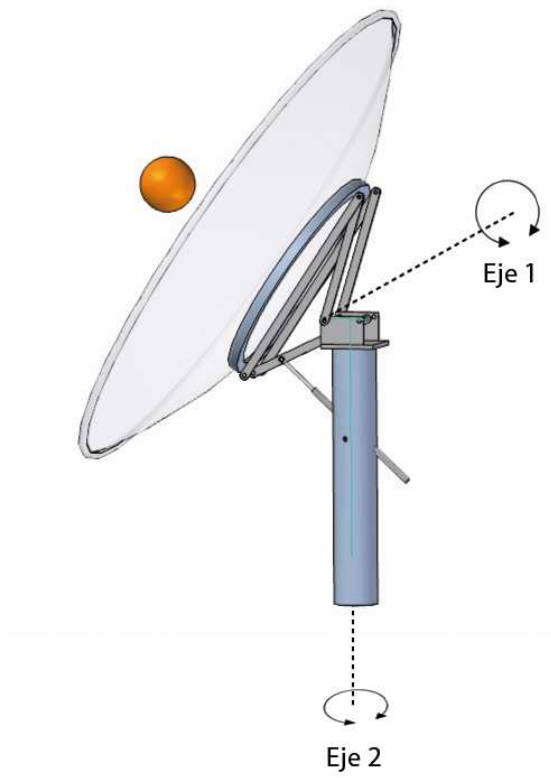


Figura 3.1: Montura 1 para colector parabólico

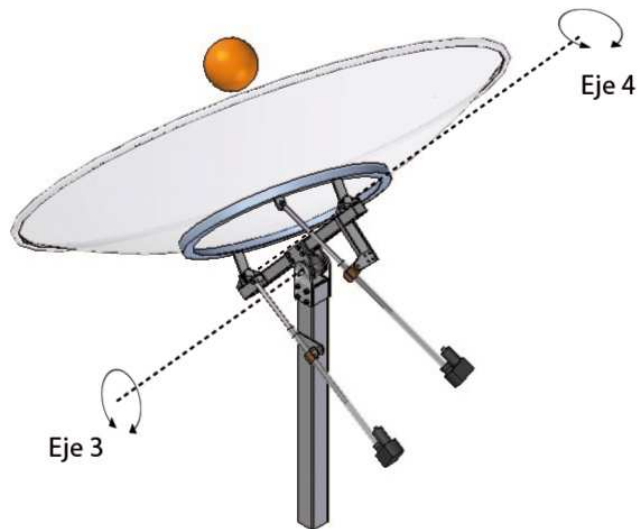


Figura 3.2: Montura 2 para colector parabólico

La montura 1 realiza su movimiento azimutal girando su eje central en torno al Eje 2 y su giro en altitud con un actuador lineal en torno al Eje 1. El motor que gira la estructura y el actuador de elevación deben trabajar en el seguimiento de manera intermitente durante todo el día.

La montura 2 cuenta con dos actuadores lineales para realizar el seguimiento. Gira en elevación en torno al Eje 3 y en azimut en torno al Eje 4. Esta montura, dada su configuración, no necesita ocupar ambos actuadores lineales constantemente en el día ya que el seguimiento solar lo realiza casi en su totalidad con el actuador de azimut (eje 4), ocupándose el actuador de elevación (eje 3) para levantar al colector al comienzo del día, hacer pequeñas correcciones a lo largo de éste y bajar al colector en el ocaso.

El siguiente cuadro sirve para comparar ambas monturas

Cuadro 3.2: Tabla comparativa de monturas 1 y 2

	Montura 1	Montura 2
Dificultad de construcción	Media	Baja
Giro en Azimut	0°-360°	0°-180°
Giro en Altitud	0°-90°	0°-90°
Nivel de mantención	Bajo	Bajo
Precio comparativo	1.5	1
Robustez para trabajo en intemperie	Muy Buena	Buena

Como se ve en el cuadro anterior, la montura 1 tiene un giro libre en azimut ya que su eje central (eje 2) puede rotar sin restricciones, lo cual es una ventaja con respecto a la montura 2 la cual aunque cubre el horizonte azimutal, tiene una restricción en este movimiento .

Desde el punto de vista de la construcción de las monturas, el eje 2 de la montura 1 tiene un nivel de dificultad mayor ya que se deben colocar los rodamientos, ejes y motor dentro del pilar central lo cual además encarece esta montura. La montura 2 es más barata ya que sus piezas son de baja complejidad de manufactura y los actuadores lineales pueden funcionar a la intemperie, por lo cual basta que estén agarrados a la estructura.

Desde el punto de vista energético, la montura 2 consume menos energía que la montura 1 en el seguimiento solar ya que solo ocupa un actuador lineal de manera intensiva en el día para seguir al sol (el actuador que rota el colector en torno al eje 4), mientras que la montura 1 necesita de ambos motores de manera intensiva para realizar el mismo seguimiento.

Por las razones expuestas anteriormente, la montura a construir será la montura 2.

Determinación de la Energía usada en el seguimiento

En la figura 3.3 se puede ver el colector y los dos sistemas de referencia que se ocuparán.

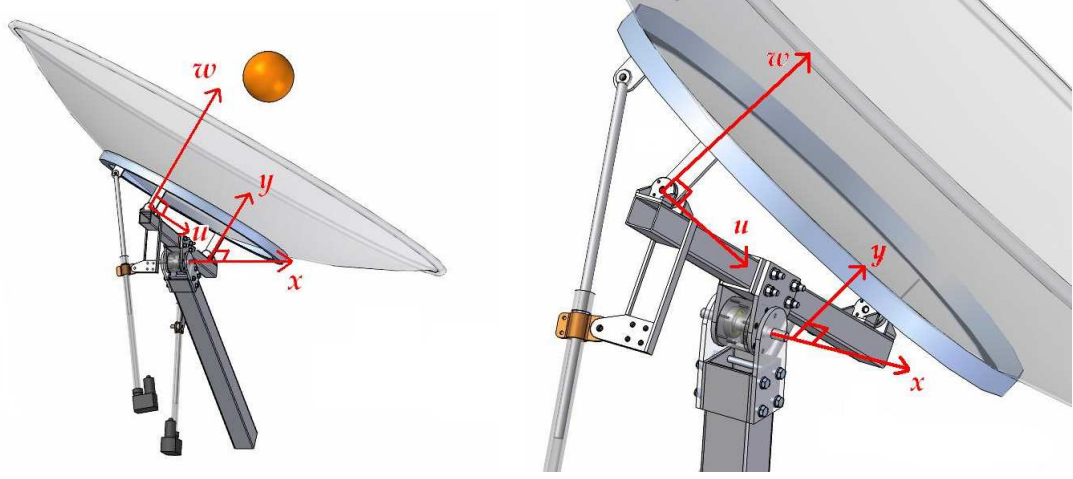


Figura 3.3: Sistemas de referencia (x, y, z) y (u, v, w)

El sistema $(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z})$ es un sistema cartesiano fijo con x paralelo al eje de rotación en elevación. El sistema $(\mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{w})$ es un sistema cartesiano que gira solidario con el colector y con w paralelo a la línea focal ($\mathbf{u} \times \mathbf{v} = \mathbf{w}$). Dadas las bajas velocidades que experimenta el sistema, este sistema solidario se puede tomar también como inercial para todos los cálculos. Las ecuaciones que gobiernan las rotaciones en elevación y azimuth vienen dadas por

$$\tau_{\hat{i}} = I_{\hat{i}} \ddot{\beta} \quad (3.1)$$

$$\tau_{\hat{v}} = I_{\hat{v}} \ddot{\psi} \quad (3.2)$$

Donde τ e I representan la suma de los torques y la suma de los momentos de inercia respectivamente con respecto al eje indicado. El ángulo β es el que se forma entre el vector $\mathbf{v}$ y la horizontal, mientras que ψ es el ángulo de giro en azimuth, como se puede ver en la figura 3.4.

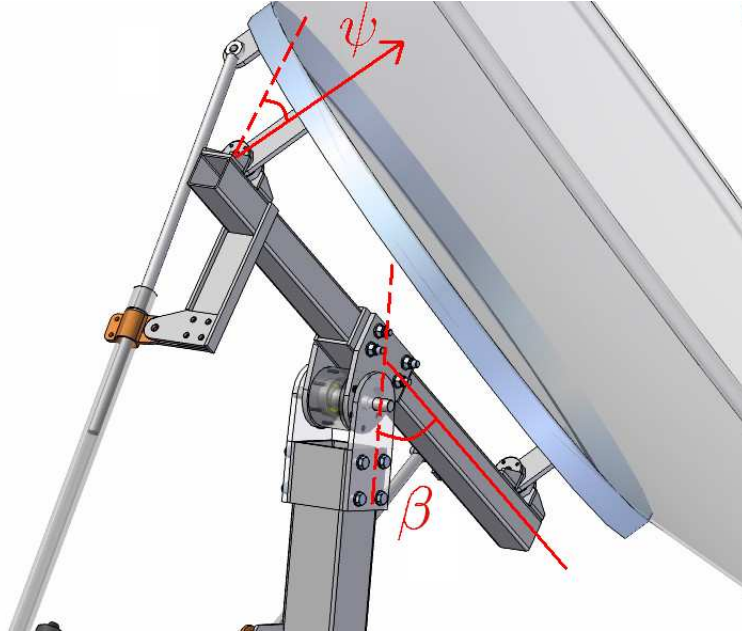


Figura 3.4: Ángulos β y ψ

El ángulo β no es igual al ángulo de elevación θ del sol, sino que depende de la latitud y de la época del año. Además es importante notar que dada la configuración de la montura se cumple que

$$\dot{\psi} = \dot{\omega} \quad (3.3)$$

donde ω es el ángulo de hora solar definido en 2.2.3.

El colector en su modelación puede ser considerado como una superficie. Su radio r_c es de 1.3 [m] y su altura h_c de 0.3 [m] (ver figura 3.5); tiene un peso aproximado de 80 [kg], ya que está hecho de aluminio. Su área superficial es de 5.58 [m^2].

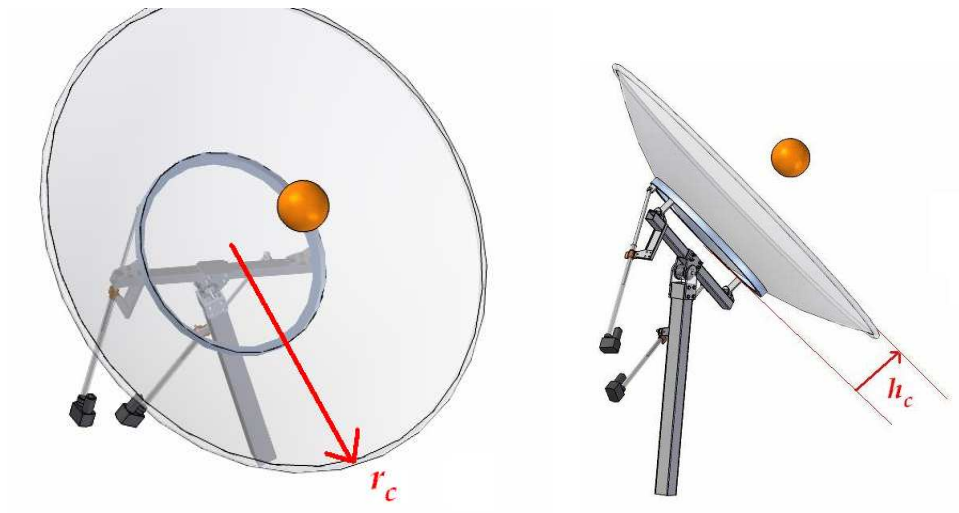


Figura 3.5: Medidas en el colector

El momento de Inercia de una superficie se define como

$$I_{ij} = \int \int_S \sigma(\vec{r})(r^2 \delta_{ij} - x_i x_j) dS \quad (3.4)$$

donde $\sigma(\vec{r})$ representa la densidad para una posición dada y δ_{ij} e x_i se definen como

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & , i = j \\ 0 & , i \neq j \end{cases} \quad x_i = \begin{cases} x & , i = 1 \\ y & , i = 2 \\ z & , i = 3 \end{cases} \quad (3.5)$$

La parametrización del colector en coordenadas cilíndricas viene dada por:

$$x^2 + y^2 = cz \quad (3.6)$$

$$\vec{r}_{u,v,w} = r\hat{r} + \frac{r^2}{c}\hat{k} \quad (3.7)$$

El diferencial dS se calcula como

$$dS = \left\| \frac{d\vec{r}}{dr} \times \frac{d\vec{r}}{d\theta} \right\| dr d\theta \quad (3.8)$$

El momento de inercia del colector con respecto al eje $\hat{i}$ se puede escribir, en cualquier momento, como [7]

$$I_{xx} = I_{uu} \cos^2(\psi) + I_{ww} \sin^2(\psi) \quad (3.9)$$

El receptor del colector se puede modelar como un paralelepípedo de base $b = 0.2$ [m], altura $h = 0.18$ [m] y fondo $f = 0.6$ [m] de masa 15 [Kg], como se puede ver en la figura 3.6.

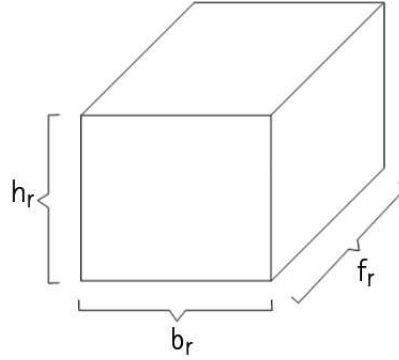


Figura 3.6: Modelo de receptor

Los momentos de inercia de este volumen vienen dados por [7]

$$I_{vv_r} = \frac{m}{12}(h^2 + b^2) \quad I_{ww_r} = \frac{m}{12}(f^2 + b^2) \quad I_{uu_r} = \frac{m}{12}(h^2 + f^2) \quad (3.10)$$

El momento de inercia del receptor con respecto al eje $\hat{i}$ se puede escribir, en cualquier momento, como [7]

$$I_{xx_r} = I_{uu_r} \cos^2(\psi) + I_{ww_r} \sin^2(\psi) \quad (3.11)$$

Las ecuaciones 3.1 y 3.2 pueden reescribirse como

$$\tau_{elev} - M_s g \Delta \cos(\beta) \cos(\psi) = (I_{xx} + I_{xx_r} + M_r \Delta^2) \ddot{\beta} \quad (3.12)$$

$$\tau_{azim} - M_s g \Delta \sin(\beta) \sin(\psi) = (I_{ww} + I_{ww_r} + M_r \Delta^2) \ddot{\psi} \quad (3.13)$$

Donde τ_{elev} y τ_{azim} son los torques provocados por fuerzas que se deben aplicar en forma perpendicular a los ejes de giro del colector. M_r es el peso del receptor y Δ es la distancia entre el centro de masa del receptor y el centro del colector.

Para conocer las características de los motores a ocupar es necesario determinar la fuerza máxima y el largo máximo que debe desarrollar cada actuador lineal.

Sean A y B los puntos de fijación del actuador lineal de elevación al colector y al eje central respectivamente y C y D los puntos de fijación del actuador lineal de azimuth al colector y al eje central respectivamente. Sean O_1 y O_2 puntos en el eje central como se indica en la figura 3.7.



Figura 3.7: Puntos de referencia en el colector

Como se puede ver en la figura 3.7, la fuerza aplicada por los actuadores de elevación y azimuth no es perpendicular a los ejes O_1A y O_2C respectivamente, por lo cual hay que descomponer las fuerzas para encontrar la fuerza aplicada por cada actuador.

La fuerza aplicada por el actuador de elevación, al amanecer, para un día de verano viene dada por

$$F_{elev} = \frac{\tau_{elev}}{\overline{O_1A}} \frac{1}{\cos(\epsilon)} \quad (3.14)$$

donde

$$\tan(\epsilon) = \frac{\overline{O_1B} \cos(\beta) - \overline{O_1A}}{\overline{O_1B} \sin(\beta)} \quad (3.15)$$

El ángulo θ fue definido en 2.2.3.

La fuerza aplicada por el actuador de azimuth viene dada por

$$F_{azim} = \frac{\tau_{azim}}{\overline{O_2C}} \frac{1}{\cos(\epsilon_2)} \quad (3.16)$$

donde

$$\cos(\epsilon_2) = \frac{\overline{O_2D} \sin(\psi + \alpha)}{l_{azimut}} \quad (3.17)$$

y $\cos(\alpha) = \frac{0,1}{\overline{O_2D}}$. El ángulo ψ fue definido anteriormente.

El largo del actuador lineal de elevación viene dado como

$$l_{elevacion}^2 = \overline{O_1A}^2 + \overline{O_1B}^2 - 2\overline{O_1A}\overline{O_1B} \cos(\beta) \quad (3.18)$$

El largo del actuador lineal de azimuth viene dado como

$$l_{azimut}^2 = \overline{O_2C}^2 - \overline{O_2D}^2 + 2\overline{O_2C}\overline{O_2D} \cos(\psi + \alpha) \quad (3.19)$$

Las distancias entre los puntos definidas anteriormente son fijas y vienen dadas por el diseño mecánico de la montura. Estas son

$$\overline{O_1A} = 35[cm] \quad \overline{O_1B} = 40[cm] \quad \overline{O_2C} = 27,3[cm] \quad \overline{O_2D} = 30,2[cm] \quad (3.20)$$

Las simulaciones en *Matlab* donde se implementaron las ecuaciones anteriores, se pueden encontrar en el apéndice B.

Las curvas de fuerza ejercidas por los actuadores de elevación y azimuth, en los días de mayor exigencia, en función de los ángulos β y ψ se puede ver en las figuras 3.8 y 3.9.

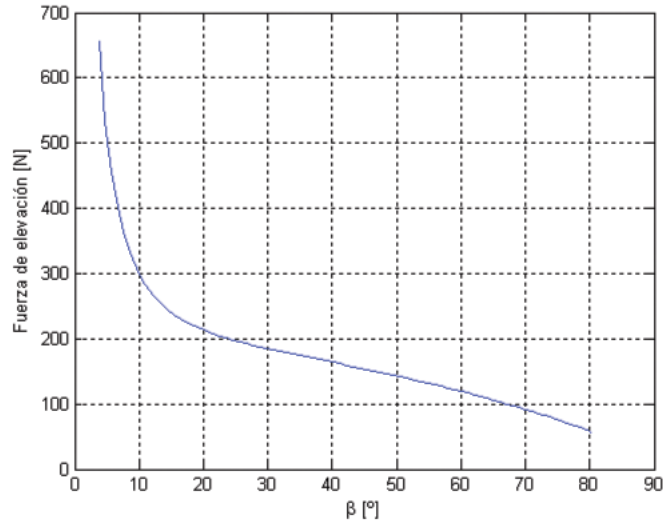


Figura 3.8: Fuerza ejercida por el actuador lineal de elevación en verano

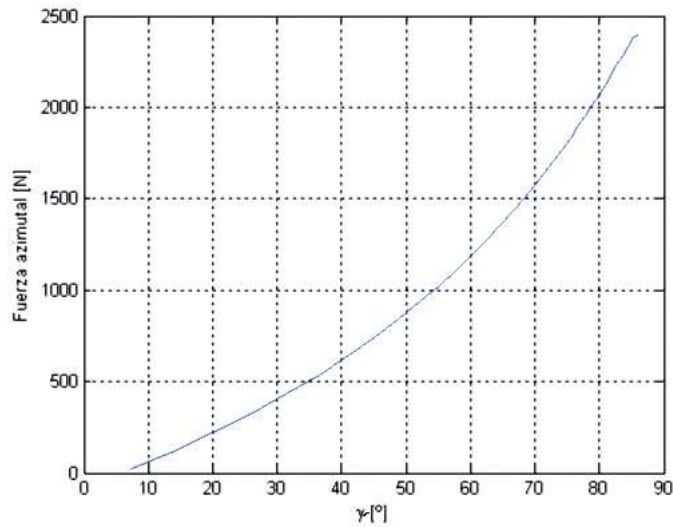


Figura 3.9: Fuerza ejercida por el actuador lineal de azimut en verano

Como se dijo en el punto 3.2.1, el actuador de elevación actúa solo al comienzo y al final del día, ocupándose solo de manera esporádica en el transcurso de éste. Tiene una mayor exigencia en verano, donde debe levantar al colector hasta su más alta posición.

El actuador de azimut, el cual realiza el seguimiento del sol, tiene también su mayor exigencia en verano.

Los largos máximos desarrollados por ambos actuadores se pueden ver en las figuras 3.10 y 3.11.

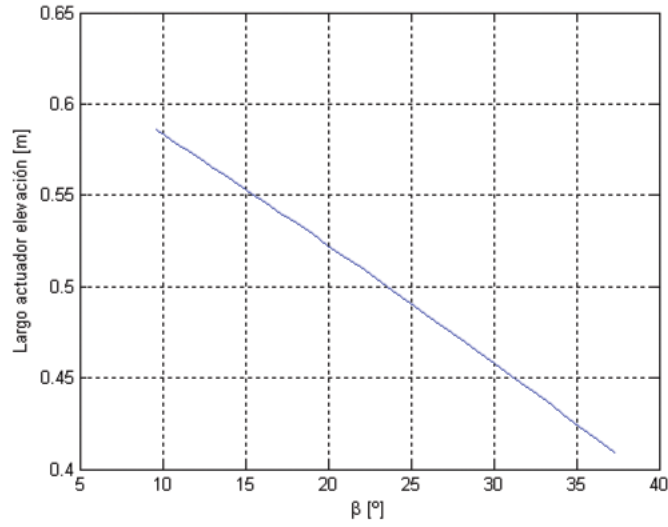


Figura 3.10: Largo del actuador lineal de elevación en verano

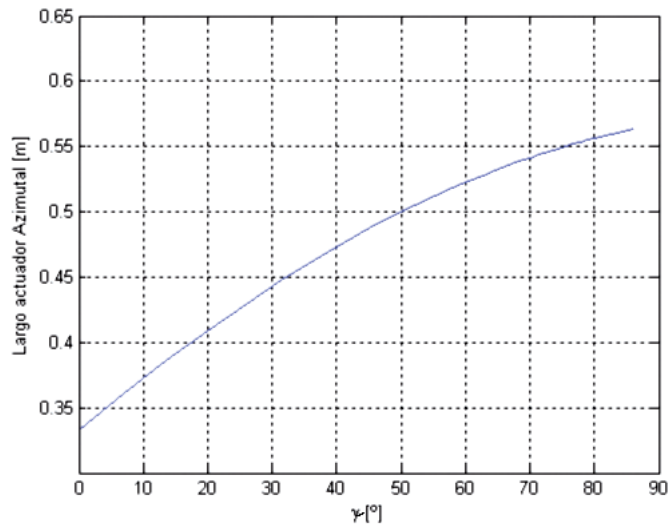


Figura 3.11: Largo del actuador lineal de azimuth en verano

Dados los requerimientos máximos de los actuadores, fue elegido el modelo HARL-3624 Super PowerJack Actuator. Este actuador necesita una fuente de 36 [V DC] y tiene un largo de brazo máximo de 690 [mm] (24"). Sus características de rapidez vs. fuerza y corriente vs. fuerza se pueden ver en las figuras 3.12 y 3.13.

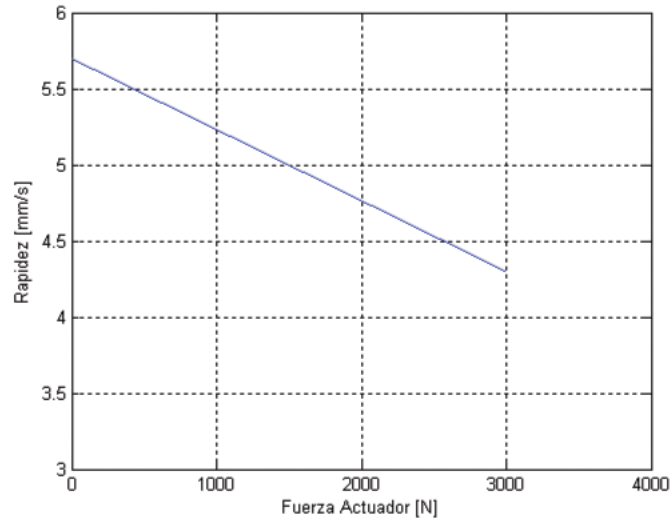


Figura 3.12: Rapidez del actuador lineal en función de la carga

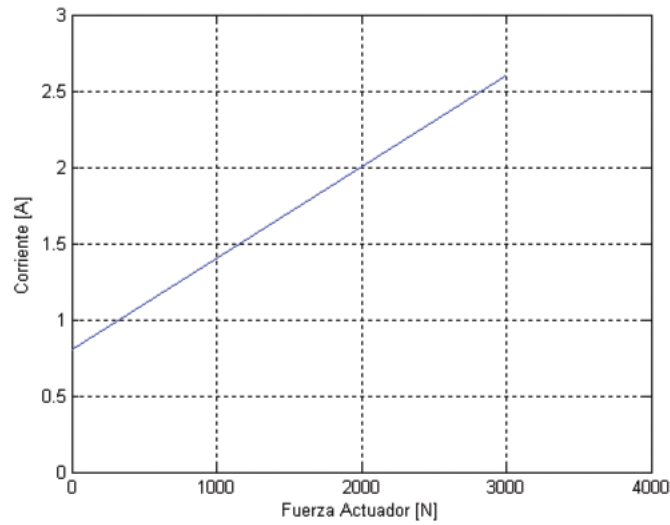


Figura 3.13: Corriente consumida por el actuador lineal en función de la carga

Con las características antes mostradas, se puede saber la potencia consumida por los motores y finalmente calcular el consumo diario de energía de éstos.

La potencia para el motor de elevación o azimut, en un momento cualquiera en el día, se puede calcular como

$$P(\omega_i) = 36 \cdot I(F(\omega_i)) \quad [W] \quad (3.21)$$

donde ω es el ángulo horario definido en 2.2.3 e $I(F)$ es la corriente que se calcula de la figura 3.13. La diferencia de tiempo entre ω_{i+1} y ω_i viene dado por el tiempo en que el sistema no sigue al sol (por ejemplo 5 minutos).

La energía consumida en un día por ambos motores viene dado por

$$E_{Motores} = \sum_{dia} (P_{elev}(\omega_i) \cdot \Delta t_{1_i} + P_{azim}(\omega_i) \cdot \Delta t_{2_i}) \quad [Wh] \quad (3.22)$$

Si se define $E_{oca \rightarrow ama}$ como la energía ocupada en llevar al colector desde su posición de ocaso a la posición de salida del sol y E_{electr} como la energía consumida por el sistema electrónico, entonces la energía total consumida por el sistema de seguimiento para un día normal sería

$$E_{TOTAL} = E_{Motores} + E_{oca \rightarrow ama} + E_{electr} \quad (3.23)$$

3.2.2. Simulación termodinámica

Esta simulación busca encontrar qué flujo de energía hay en el foco y a qué temperatura puede llegar un objeto en éste. Un factor relevante a calcular en la simulación es la razón de concentración (CR) de un colector parabólico, la cual puede ser definida como

$$CR = \frac{A_{ac}}{A_f} \quad (3.24)$$

donde A_{ac} es el área de aceptación del colector, la cual es el área definida por la circunferencia de su borde y A_f es el área de la zona focal.

Reflexión de un rayo en el colector

Un colector paraboloide puede ser parametrizado en coordenadas polares como en (3.7), esto es visto desde el sistema $(\mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{w})$ de la figura 3.3. Si se quiere escribir esta parametrización con respecto al sistema $(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z})$ de la misma figura, entonces se debe escribir de la forma

$$\vec{r}_{u,v,w} = R_y(\gamma) R_x(\theta) \vec{r}_{x,y,z} \quad (3.25)$$

donde R_z y R_y son las matrices de rotación en los ejes z e y .

Para términos de la modelación, es más útil tener la relación inversa de 3.25, o sea

$$\vec{r}_{x,y,z} = R_y^T(\gamma) R_x^T(\theta) \vec{r}_{u,v,w} \quad (3.26)$$

Un vector normal al colector en una posición dada puede ser calculado como

$$\hat{n} = \frac{\frac{d\vec{r}_{x,y,z}}{d\rho} \times \frac{d\vec{r}_{x,y,z}}{d\theta}}{\left\| \frac{d\vec{r}_{x,y,z}}{d\rho} \times \frac{d\vec{r}_{x,y,z}}{d\theta} \right\|} \quad (3.27)$$

Un vector incidente, desde el centro del sol y paralelo al eje de simetría del colector, puede escribirse de la forma

$$\hat{d}_i = -\hat{r}(\gamma_s, \theta_z) \quad (3.28)$$

donde γ_s y θ_z fueron definidos en 2.2.3.

El vector reflejado en el colector viene dado por la solución no trivial de

$$-\hat{v}_r \cdot \hat{n} = \hat{d}_i \cdot \hat{n} \quad (3.29)$$

El desarrollo anterior se programó en *Matlab 7.0*, encontrándose gráficamente lo que se ve en la figura 3.14 (ver apéndice B).

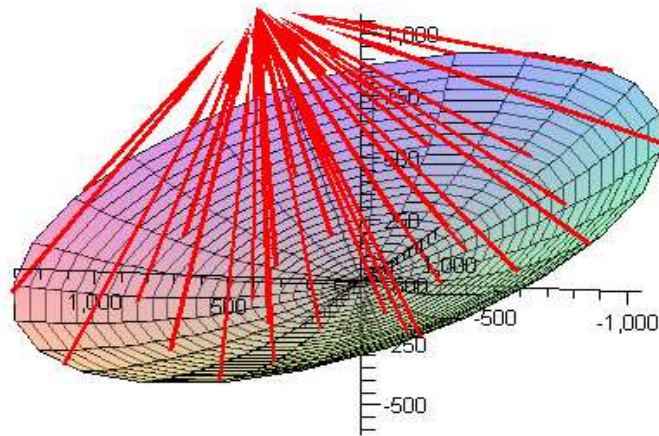


Figura 3.14: Colector parabólico y vectores reflejados

Cálculo de la razón de concentración

Idealmente, cuando un rayo incidente es paralelo al eje de simetría del colector, el rayo reflejado converge en un punto el cual es el foco del colector. Sin embargo, hay múltiples factores en la realidad que inciden en que el foco no sea un punto sino un área, llamada zona o área focal.

Entre estos factores destacan:

- (1) Los rayos provenientes del sol no son paralelos entre sí, ya que el sol tiene un radio finito. Desde la Tierra, el sol se ve como un disco circular que subtiende un ángulo de $32'$ de arco. Como una primera aproximación, se puede suponer que la intensidad de radiación es uniforme sobre el disco solar. En realidad el sol es más brillante en su centro y decae hacia los bordes [11].
- (2) La superficie de reflexión no es perfecta, por lo cual la reflexión no es especular. Además hay que tomar en cuenta el coeficiente de reflexión ρ .
- (3) La forma del colector no es perfectamente parabólica.
- (4) El seguimiento solar no es perfecto.

Para determinar CR se han tomado en cuenta los factores (1) y (2) y los demás se han despreciado. Para un estudio más detallado sobre la distribución de flujo energético en el foco se puede revisar bibliografía especializada [11].

Al ser imperfecta la superficie del colector, la reflexión de un rayo incidente deja de ser perfecta o especular y pasa a tener una componente difusa. Esto se puede modelar sumando un ángulo de dispersión δ al cono reflejado, como se ve en la figura 3.15.

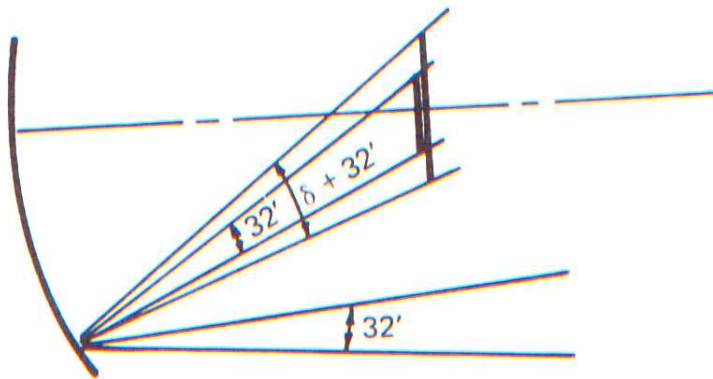


Figura 3.15: Esquema de un cono incidente y un cono reflejado con ángulo de dispersión incluído

El vector incidente $\hat{d}_i$ es el eje del cono incidente y el vector reflejado $\hat{d}_r$ es el eje del cono reflejado.

El cono reflejado forma una elipse al intersectar con el plano focal, por lo cual la suma de todas las elipses provocadas por cada rayo forma una zona focal cuyo radio depende del grado de perfección del espejo reflector.

Si la parametrización del rayo reflejado viene dada en el sistema $(\mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{w})$ por

$$\vec{v}_r = \hat{r}(\phi_r, \theta_r) \quad (3.30)$$

entonces la parametrización de la elipse de intersección (en el sistema $(\mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{w})$) viene dada por

$$\vec{r}_{ellipse}(\theta) = \vec{r}_{in} + \frac{z_{plano} - z_{ref}}{\cos(\phi_r) \sin(\theta_r) \cos(\theta) + \sin(\phi_r) \sin(\theta_r) \sin(\theta) + \frac{\cos(\theta_r)}{\tan(16' + \delta/2)}} \hat{\rho}(\theta) \quad (3.31)$$

donde $\vec{r}_{in}$ es el punto de intersección entre el vector reflejado y el plano focal, z_{plano} es la altura del plano focal, z_{ref} es la componente z del punto de reflexión colector-vector incidente y $\hat{\rho}$ es el vector polar en el plano focal.

Con las ecuaciones mostradas anteriormente, se programó en *Matlab 7.0* una aplicación la cual dada una posición del sol y una posición del colector (los cuales no tienen porque estar alineados), representa gráficamente la zona focal resultante. Para mayor información ver apéndice B.

Algunos resultados de esta simulación se puede ver en las figuras 3.16 y 3.17 (de color azul) en la situación que el colector está alineado con el sol, para dos distancias dadas desde el colector.

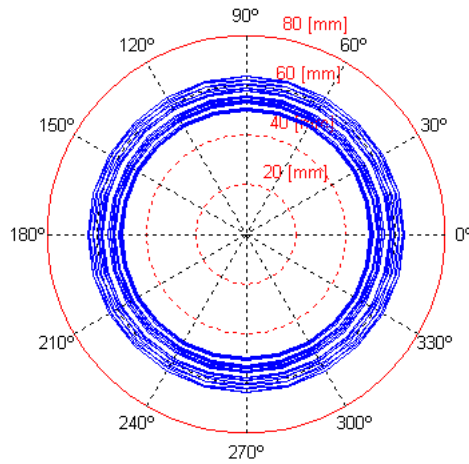


Figura 3.16: Foco formado por las elipses de intersección a distancia focal, radio focal 7 cm, $\delta = 1,5^\circ$

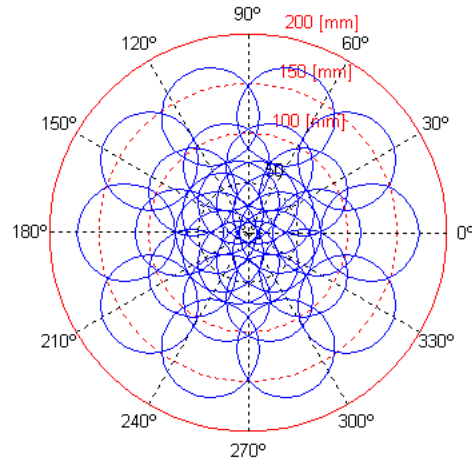


Figura 3.17: Foco formado por las elipses de intersección a 10 cm sobre la distancia focal, radio focal 15 cm, $\delta = 1,5^\circ$

También es posible ver el comportamiento del foco en el caso que el colector está desalineado con el sol. Por ejemplo en la figura 3.18 se puede ver la posición del foco para un corrimiento en $\Delta\theta = \pi/24$ y $\Delta\gamma = \pi/24$.

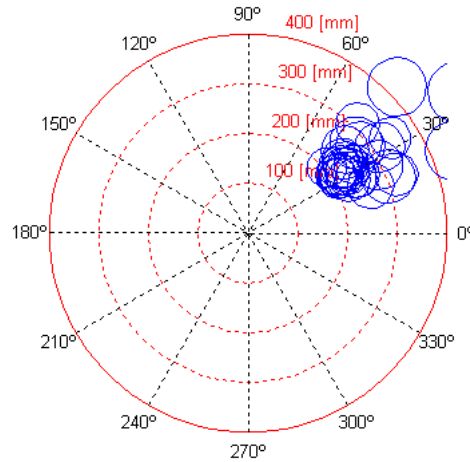


Figura 3.18: Foco formado con colector desalineado en $\Delta\theta = \pi/24$ y $\Delta\gamma = \pi/24$

En las figuras anteriores se puede ver que la formación del foco es crítica en cuanto a distancia y orientación se refiere, por lo cual es altamente recomendable que el colector parabólico esté en todo momento dirigido hacia el sol, ya que de otra forma el foco no es fijo y su diámetro aumenta.

Por lo anterior, la simulación realizada no tiene gran aplicación en este tipo de colectores ya que el foco debe estar idealmente fijo, sin embargo, las ecuaciones que se obtienen son generales y podrían ser aplicadas en otro tipo de colectores solares como los cilindro-parabólicos, los cuales realizan seguimiento en un eje o en colectores parabólicos con aplicaciones en cocinas solares, los que normalmente carecen de sistema de seguimiento y por lo tanto una zona focal dinámica.

En el colector a ocupar, el foco tiene aproximadamente un diámetro de 15 [cm], por lo cual su ángulo de dispersión es del orden de $1,5^\circ$, como lo muestra la simulación anterior.

Teniendo el diámetro del foco del colector y sabiendo que su área de aceptación es de $\pi(1,2)^2 [m^2]$, entonces de la fórmula 3.24 se deduce que

$$CR = \frac{\pi \cdot 1,2^2}{\pi \cdot 0,075^2} = 256 \quad (3.32)$$

Flujo de energía en el foco del colector

En condiciones ideales, el flujo de energía por el foco del colector podría escribirse como

$$I_{fci} = I_d(n, \theta, h)CR \quad [W/m^2] \quad (3.33)$$

donde $I_d(n, \theta, h)$ viene dado por la ecuación 2.10. Sin embargo, hay que considerar la dispersión del flujo en la atmósfera ($\eta_a \leq 1$) y las pérdidas en el reflectante del colector ($\eta_r \leq 1$), por lo cual

$$I_f = \eta_a \eta_r I_d(n, \theta, h)CR \quad [W/m^2] \quad (3.34)$$

El término $\eta_a I_d(n, \theta, h)$ se puede determinar usando un piranómetro local y $\eta_r = \rho$ es una propiedad intrínseca del reflectante.

3.2.3. Análisis térmico en el receptor

El receptor (o absorbente focal) recibe la radiación solar concentrada y la transforma en energía térmica para ser utilizada en procesos posteriores. La labor principal de éste es absorber la máxima cantidad de radiación incidente y transferirla en forma de calor, con mínimas pérdidas, a un fluido de trabajo. Generalmente es usado un receptor con forma de cavidad, donde la forma de la cavidad depende de la calidad del reflector. Para colectores que forman un foco volumétrico e imagen focal difusa (como el que se ocupará experimentalmente), es preferible ocupar receptores como se ven en las figuras 3.19 y 3.20

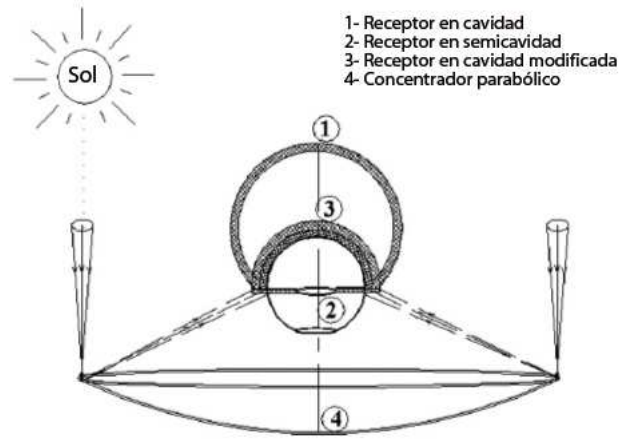


Figura 3.19: Dibujo conceptual del colector y receptores [14]

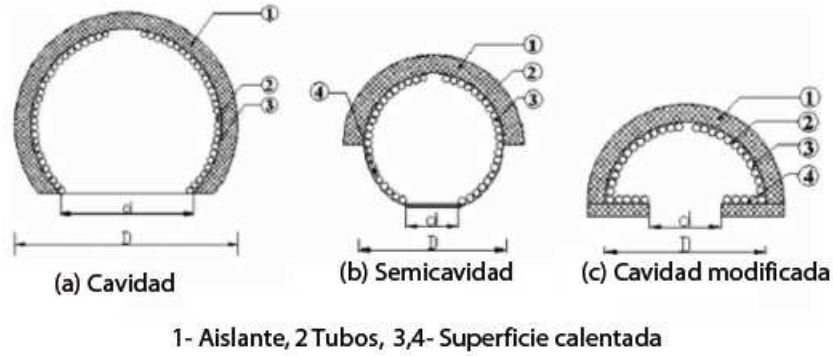


Figura 3.20: Receptores adecuados para uso en el colector [14]

La eficiencia del sistema colector-receptor, definida como la razón entre la energía entregada al fluido y la energía incidente, se puede expresar como

$$\eta_R = 1 - \frac{Q_L}{\rho I_d (A_{ac} - A_r)} \quad (3.35)$$

donde Q_L es la tasa de pérdida total de energía desde el receptor y A_r es el área de la sombra que proyecta el receptor sobre el colector.

En el término Q_L se encuentran las pérdidas por convección y radiación de la superficie externa expuesta del receptor y las pérdidas por conducción, radiación y convección de la superficie de los tubos por donde circula el fluido de trabajo. Por lo cual, Q_L se expresa como

$$Q_L = Q_{SC} + Q_{SR} + Q_{CK} + Q_{CC} + Q_{CR} \quad (3.36)$$

El sistema colector-receptor a experimentar no tiene un fluido de trabajo circulante, por lo que toda la energía incidente será disipada como pérdidas. Por lo cual $\eta_R = 0$ y

$$Q_{CK} = Q_{CC} = Q_{CR} = 0.$$

En este caso se alcanza la máxima temperatura en el receptor, conocida como stagnation temperature.

Los componentes distintos de cero de Q_L son de la forma [15]

$$Q_{SC} = A_1 h_1 (T_r - T_a) \quad (3.37)$$

$$Q_{SR} = A_1 \epsilon \sigma (T_r + 273)^4 \quad (3.38)$$

$$h_1 = 1,45(T_r - T_a)^{0,333} + 4,22(V)^{0,805} \quad (3.39)$$

donde A_1 es el área expuesta del receptor, T_r es la temperatura del receptor, ϵ es la emisividad del receptor, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} [W/m^2 K^4]$ es la constante de Boltzmann, T_a es la temperatura ambiente y V es la velocidad del viento en $[m/s]$.

Si $I_d = 200 [W/m^2]$, $\epsilon = 0,75$, $V = 2 [m/s]$, $\rho = 0,7$ y $T_a = 20 [^\circ C]$ entonces un gráfico de eficiencia versus temperatura se puede ver en la figura 3.21

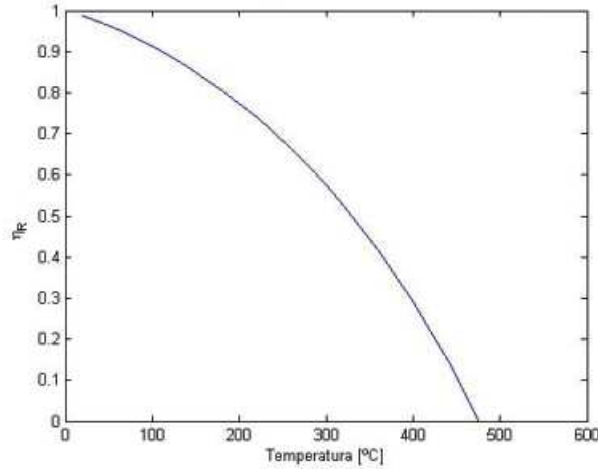


Figura 3.21: Eficiencia del sistema colector-receptor en función de la temperatura del receptor

Se puede ver del gráfico anterior que el colector alcanzará teóricamente una temperatura en torno a los 480 $^\circ C$.

Capítulo 4

Desarrollo experimental

4.1. Seguimiento solar

4.1.1. Construcción de la montura solar

Para construir la montura mostrada en la figura 3.2, fue necesario diseñar sus piezas. El diseño y las simulaciones se realizaron en *SolidEdge* [®], pudiendo tener una visión realista del comportamiento de ésta en todas sus posiciones. La montura fue sobredimensionada por factores de seguridad estándares a este tipo de construcciones.

La base fue hecha de forma triangular, con tres ruedas las cuales facilitan el traslado de la estructura (ver figura 4.1). La soldadura que une al perfil central con el triángulo es suficiente para soportar el peso y las posiciones del colector, sin embargo ésta se puede ir desgastando con el tiempo y podría necesitar un refuerzo.



Figura 4.1: Base transportable del colector

Sobre esta base se monta la estructura de soporte del colector la cual consta de dos perfiles cuadrados, de los cuales uno está fijo (perfil de 100 [cm] x 100 [cm] x 3 [mm]) y soporta toda la estructura y el otro soporta el colector y gira sobre el primero (80 [cm] x 40 [cm] x 3 [mm]), como se ve en la figura 4.2.



Figura 4.2: Perfiles que soportan la estructura

La montura cuenta con dos grados de libertad (elevación y azimut), por lo cual fue necesario construir dos ejes de rotación. El eje de rotación para elevación se encuentra alojado en el perfil de base, permitiendo al perfil de 80x40 girar libremente en torno a él. Los ejes de rotación de azimut son 2 y se encuentran sobre el perfil de 80x40. Estas piezas se pueden ver en las figuras 4.3 y 4.4 en su etapa de diseño y posición final en la montura.

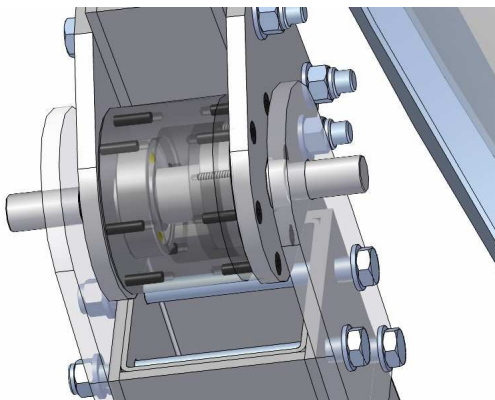


Figura 4.3: Eje de giro en elevación

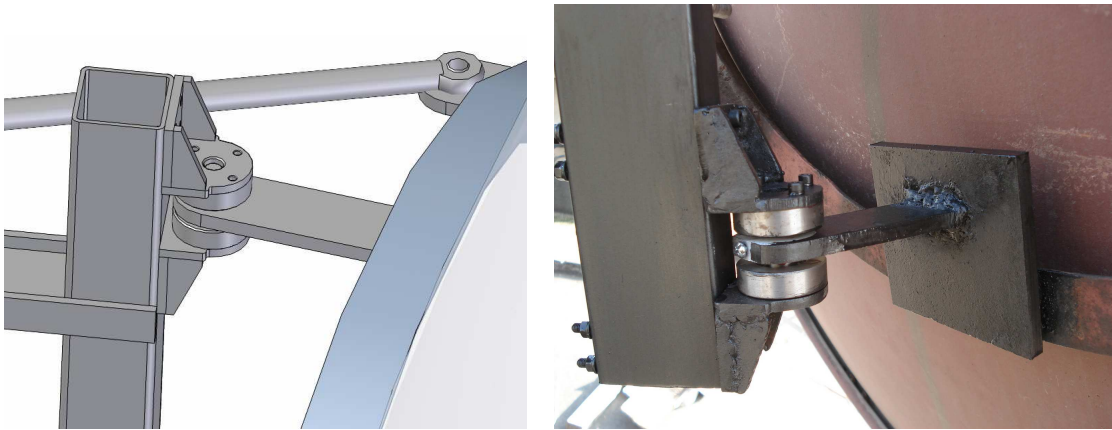


Figura 4.4: Eje de giro en azimuth

Para el giro del eje de elevación se utilizaron dos rodamientos SKF 6305 y para el eje de azimuth cuatro rodamientos SKF 6001.

Los actuadores lineales se colocaron en las posiciones establecidas por diseño, como se puede ver en la figura 4.5 y se probaron de manera satisfactoria, cumpliendo el rango de seguimiento preestablecido.



Figura 4.5: Actuadores lineales colocados en la montura

Es muy importante, al instalar por primera vez los actuadores, ponerlos completamente contraídos para una posición extrema real del colector más una pequeña distancia de seguridad (un par de cms.) antes de que el disco toque con la base. Esto se debe a que si al funcionar el sistema de forma autónoma dos piezas estructurales se tocan en una posición extrema sin

antes accionarse el limitador de movimiento, esto ocasionará altas corrientes pudiendo dañar algún componente del sistema.

El detalle de las piezas de la montura y ensamblajes se puede encontrar en el apéndice A.

4.1.2. Sistema de seguimiento solar

El seguidor solar a ocupar es el modelo *LEDDRMPP24Vc3* de Red Rock Energy [16], el cual se puede utilizar para realizar seguimiento en dos ejes. Este seguidor consta de 4 LED (2 LED por eje de giro) conectados de manera remota y dos circuitos de fuerza. El sistema completo se puede ver en la figura 4.6.

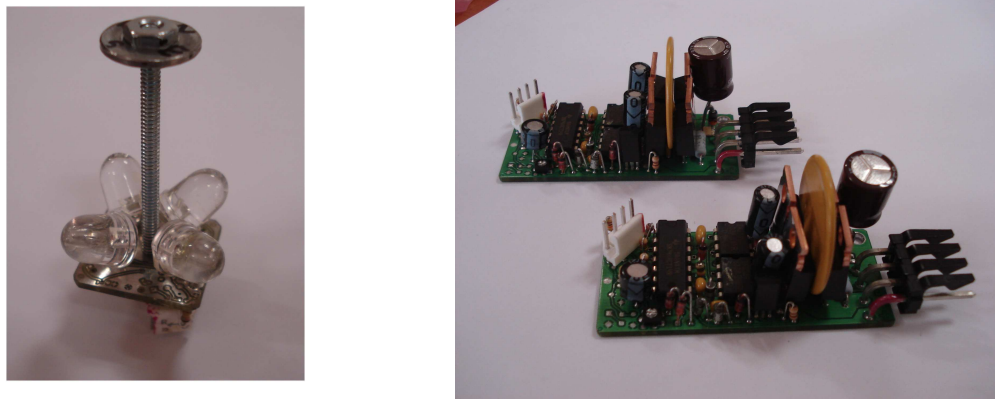


Figura 4.6: Seguidor solar

El sistema funciona básicamente por diferencia de radiación incidente entre cada LED perteneciente a un eje. Si esta diferencia de radiación incidente supera un valor determinado por el fabricante, se envía una señal al circuito de fuerza correspondiente. Este circuito de fuerza es un puente H.

Un puente H es un circuito electrónico el cual permite que un motor DC gire en un sentido horario o antihorario. El término usado para este circuito proviene de su representación gráfica típica la cual se puede ver en la figura 4.7.

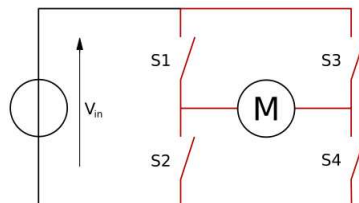


Figura 4.7: Puente H

Los puentes H son usados generalmente para cambiar la polaridad en bornes del motor, sin embargo también pueden ser usados como interruptores de marcha del motor. El cuadro 4.1 resume su comportamiento (S1, S2, S3 y S4 en figura 4.7).

Cuadro 4.1: Combinaciones de los interruptores de un puente H

S1	S2	S3	S4	Resultados
1	0	0	1	Movimiento horario
0	1	1	0	Movimiento antihorario
0	0	0	0	Motor gira libremente
0	1	0	1	Motor se frena

Los interruptores S1, S2, S3 y S4 son MOSFET que funcionan en condiciones de corte o saturación.

La salida desde los circuitos de fuerza a los actuadores lineales es mediante un pulso PWM, el cual tiene un ciclo de trabajo dependiente de la salida diferencial que entregan los LED. Como se vió en el punto 2.5, es importante que la montura cuente con una velocidad lenta dada por el seguimiento solar y una rápida en caso de emergencia o mantención. Para esto se contruyó, para cada actuador lineal, el circuito que se ve en la figura 4.8, en el cual se ocupan 4 switches para hacer el cambio de velocidades en ambas direcciones.

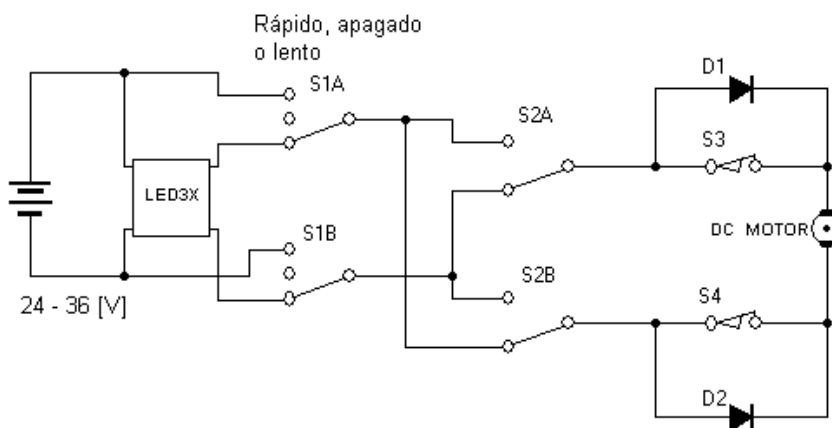


Figura 4.8: Circuito para elegir velocidad lenta o rápida [16]

Si los interruptores S1A y S1B están abajo, entonces el solar tracker maneja el movimiento del motor (velocidad lenta). Si S1A y S1B están arriba, entonces el actuador estará conectado directamente a la fuente (velocidad rápida) y la dirección de giro del motor se puede controlar con S2A y S2B.

Los elementos D1, S3, S4 y D2 corresponden a los limitadores de movimiento (que vienen con los actuadores), de los cuales se habló en el punto 2.6.

Este Solar Tracker además tiene la capacidad de volver al colector desde su posición de ocaso a la posición de salida del sol de manera autónoma, haciendo uso de los limitadores de movimiento de los actuadores para detener el movimiento.

Los elementos electrónicos y de control nombrados anteriormente fueron instalados en una caja de fuerza, desde la cual se puede controlar el funcionamiento del sistema de seguimiento. En ella se encuentran dos interruptor de protección de sobrecorriente, los switches de selección de velocidad y giro y los circuitos *LEDDRMPP24Vc3*, como se puede ver en la figura 4.9.

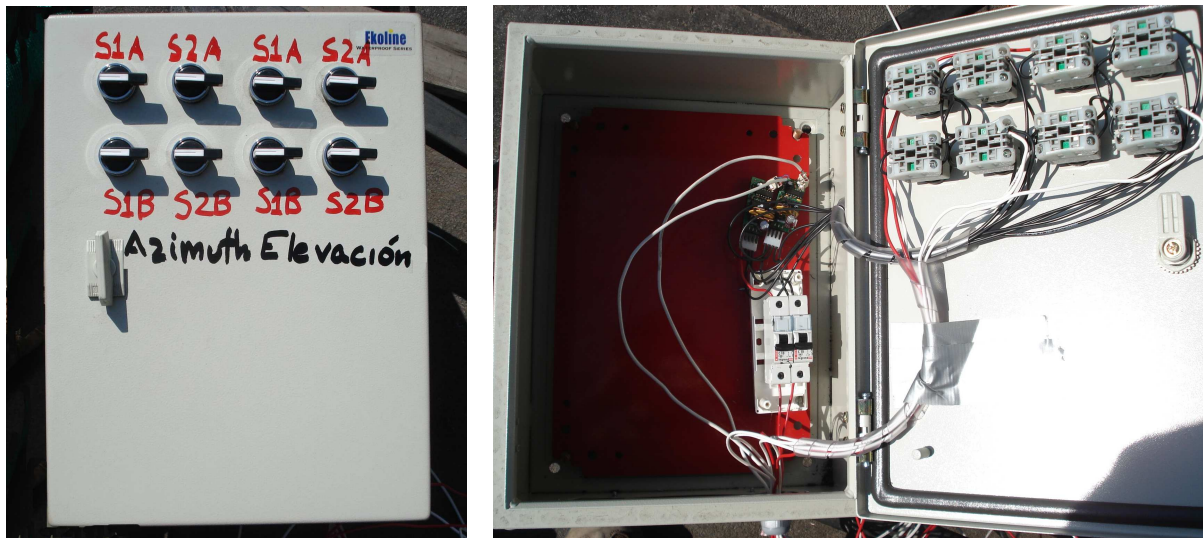


Figura 4.9: Caja de fuerza y control, vista cerrada y abierta

El grupo de LED fue instalado en una caja de acrílico a un costado del colector, como se puede ver en la figura 4.10. Esta caja fue pintada de negro para disminuir la luz reflectada desde objetos cercanos, la cual puede interferir en el seguimiento solar.



Figura 4.10: Grupo de LED del seguidor en caja oscura de acrílico

4.1.3. Mediciones experimentales en el seguimiento solar

Para medir la energía ocupada en el seguimiento, se midió la corriente consumida por los actuadores lineales a través de equipos Fluke 45, los cuales transmitían la información al computador.

Las mediciones se realizaron en Julio. Para estos días la posición del sol (en función de los ángulos γ y θ) se puede ver en la figura 4.11.

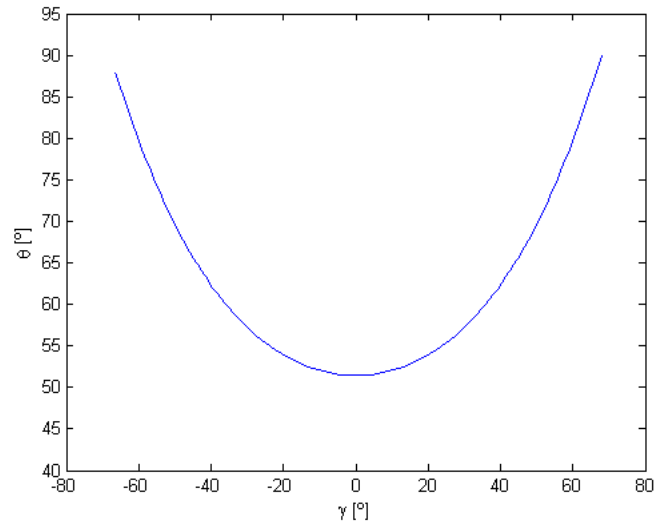


Figura 4.11: Posición del sol entre el 4 y 7 de julio

Como se vio en el punto 2.2.3, los ángulos γ positivos corresponden a horas de la tarde y negativos a la mañana.

La corriente consumida por ambos motores en el seguimiento a través del día se puede ver en las figuras 4.12 y 4.13.

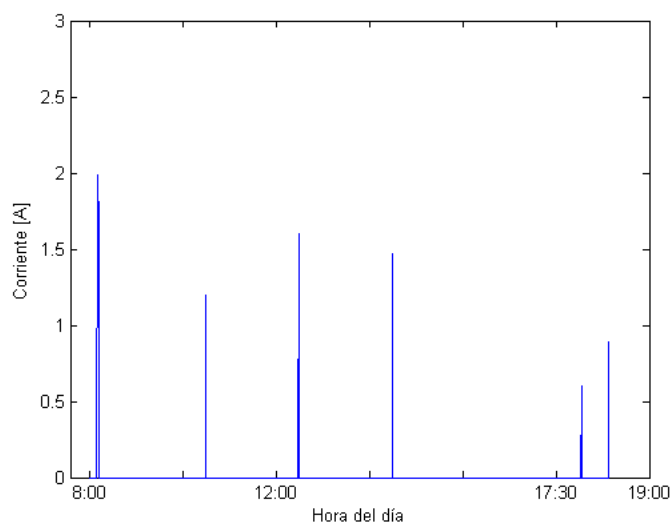


Figura 4.12: Corriente consumida por el actuador de elevación en el seguimiento

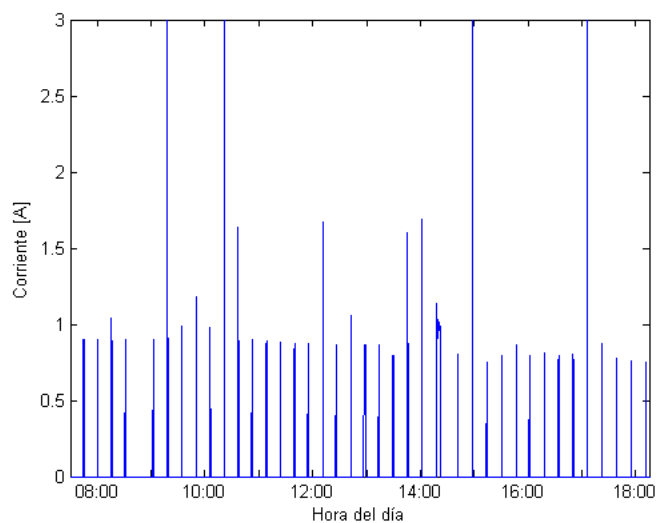


Figura 4.13: Corriente consumida por el actuador de azimut en el seguimiento

Como se puede ver en la figura 4.12, el actuador de elevación se ocupa de manera intensiva al comienzo y al final del día, y solo tiene movimientos esporádicos de corrección a lo largo de éste; mientras que el actuador de azimut es el que realiza el seguimiento del sol, como se puede ver en la figura 4.13.

Los peaks de corriente que se observan en la figura 4.13 son de corta duración (en torno a los 3 segundos) y distanciados uno de otro por períodos de tiempo cercanos a los 10 minutos.

Un movimiento relevante para el colector es su regreso desde la posición de ocaso a la de salida del sol. La corriente consumida por el actuador de azimut para este movimiento y el tiempo que utiliza se pueden ver en la figura 4.14

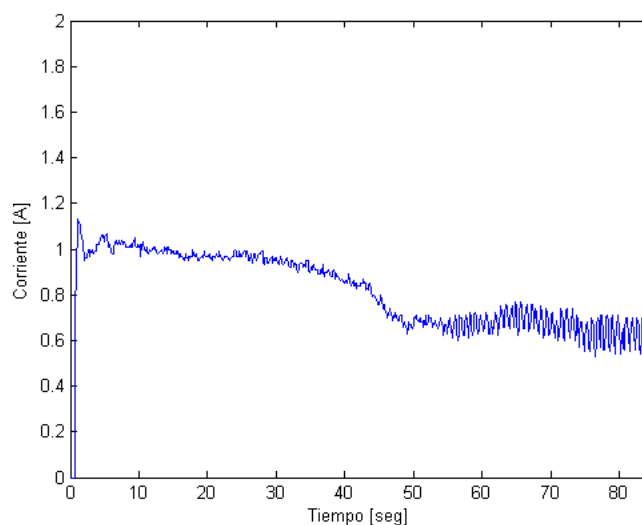


Figura 4.14: Corriente consumida por el actuador de azimut en el reposicionamiento desde el ocaso hasta la posición de salida del sol

4.2. Radiación incidente y temperatura en el foco

Para medir las variables de radiación y temperatura en el foco, es necesario construir un receptor.

El receptor que se contruyó busca simular una *cavidad modificada* (Modified cavity) que se muestra en la figura 3.20. Para esto se usó una pantalla de lámpara de acero como base del receptor, a la cual se le puso una corona de acero en su apertura para disminuir su diámetro de entrada. Toda la superficie, salvo la apertura de entrada del foco que es de 12[cm], se recubrió con *Manta Durablanket*[®] de 1 pulgada de espesor para aislar el receptor del medio ambiente como se puede ver en la figura 4.15.



Figura 4.15: Receptor construido para el colector

La *Manta Durablanket*® es una manta aislante de altas temperaturas (resiste hasta $1260[^\circ C]$ continuos).

Para realizar las pruebas se colocó el receptor en el foco y el colector se alineó al sol. La temperatura fue medida con termocuplas tipo K en la parte central del receptor, como se puede ver en la figura 4.16.

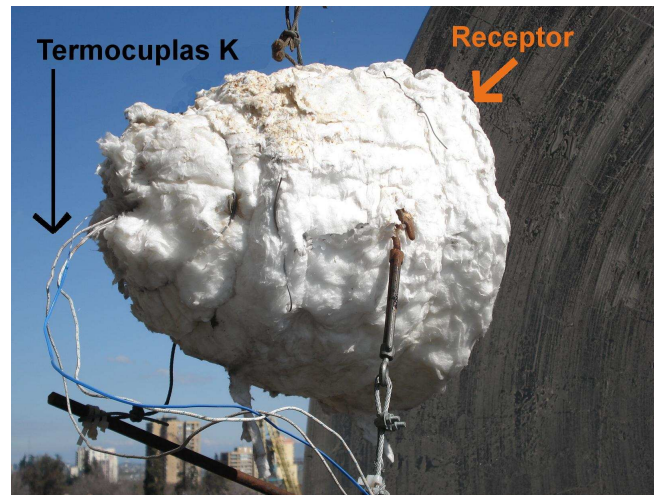


Figura 4.16: Entrada de termocuplas K por la parte posterior del receptor

La radiación incidente para los días de medición se puede ver en la figuras 4.17 y 4.18.

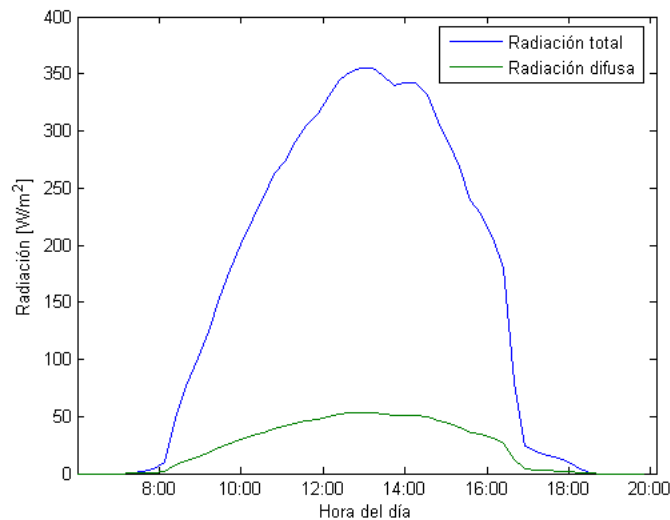


Figura 4.17: Radiación Solar el 6 de Junio

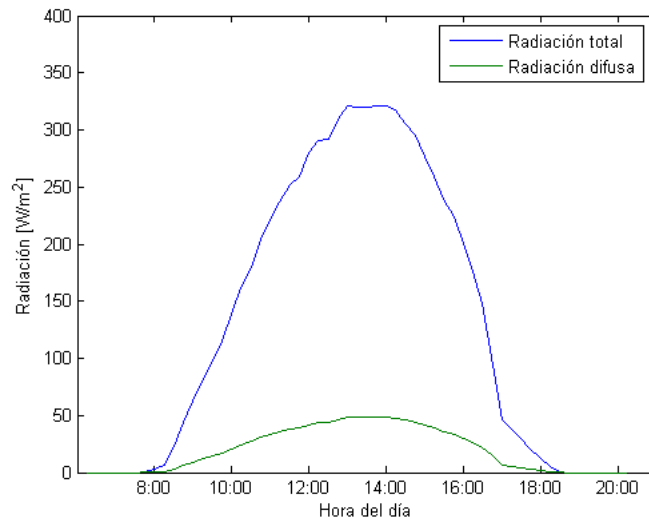


Figura 4.18: Radiación Solar el 30 de Julio

Las curvas mostradas en las figuras anteriores corresponden a la radiación medida en el plano horizontal por un piranómetro. La radiación útil para el colector es la directa, la cual es igual a la radiación total menos la radiación difusa en el plano del colector. La temperatura medida en el receptor, para estos días, viene dada por la figuras 4.19 y 4.20.

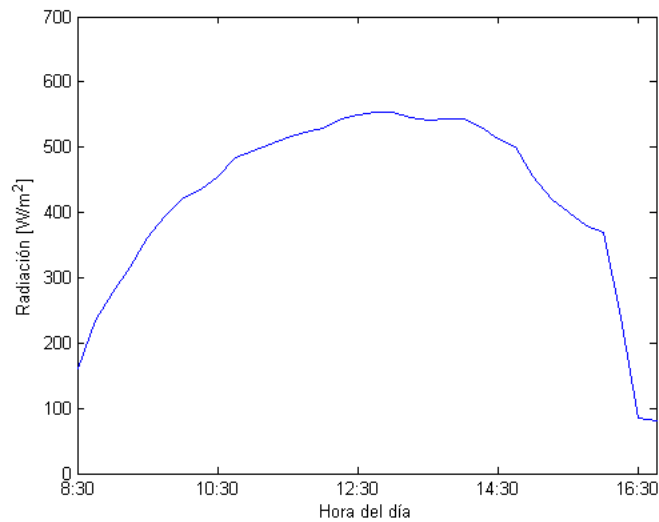


Figura 4.19: Temperatura medida en el receptor el 6 de Junio

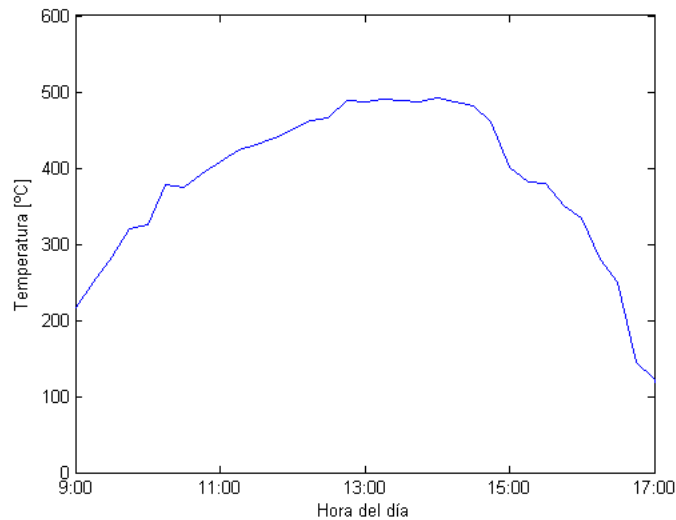


Figura 4.20: Temperatura medida en el receptor el 30 de Julio

Se puede observar la corta duración del día, la baja radiación incidente y las altas temperaturas que se llegan en el receptor. Se eligieron condiciones de viento bajas para medir, ya que es un factor preponderante en la temperatura del aire interior en el receptor.

Aunque el reflectante no sea el ideal y las fechas de medición estén en otoño-invierno, se pueden alcanzar, en un día despejado, los 500 [°C] a mediodía. En verano la temperatura en el receptor pueden alcanzar fácilmente los 800 [°C].

Como se dijo en el punto 2.3, una ubicación ideal para esta aplicación sería el norte de Chile ya que allí se podría tener una temperatura más homogénea en el receptor a lo largo del año.

Capítulo 5

Análisis de resultados

5.1. Seguimiento solar

Los resultados mostrados por las figuras 4.12 y 4.13 son altamente satisfactorios ya que se asemejan en gran medida a una montura de tipo Ecuatorial y verifican la elección hecha en el punto 3.2.1. Este tipo de montura tiene una inclinación fija igual a la latitud local ϕ y tiene variaciones en altitud según la declinación solar δ , la cual al ser lenta permite que se efectúen muy pocas correcciones durante el día. Las variaciones en azimut de esta montura vienen dadas por el ángulo horario de recorrido del sol ω , el cual tiene una velocidad angular de $15 [^\circ/hora]$. En la figura 5.1 se puede ver un esquema de montura Ecuatorial.

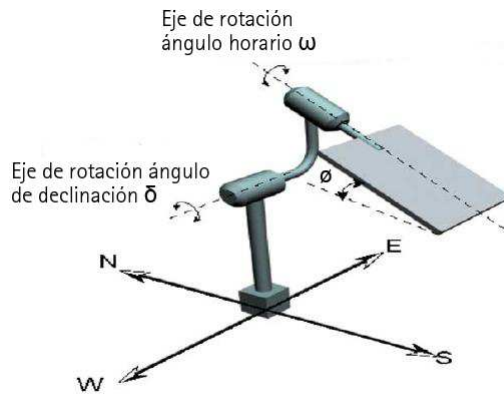


Figura 5.1: Montura Ecuatorial [13]

Al tener este tipo de característica, la montura construída minimiza el gasto energético ya que el actuador de elevación trabaja solo de manera esporádica.

Dado su bajo uso, este actuador podría eventualmente ser reemplazado por algun sistema de elevación mecánico, lo que disminuiría el costo de inversión en la montura pero restaría autoñoia al sistema, ya que necesitaría la supervisión diaria de un operario.

Es necesario realizar una comparación entre el modelo propuesto en el punto 3.2.1 y las mediciones encontradas en 4.1.3. Esto se puede ver en las figuras 5.2 y 5.3, donde se comparan las corrientes esperadas teóricamente con las encontradas experimentalmente. Dada la forma de las curvas, se han elegido tramos del día para observar mejor los resultados.

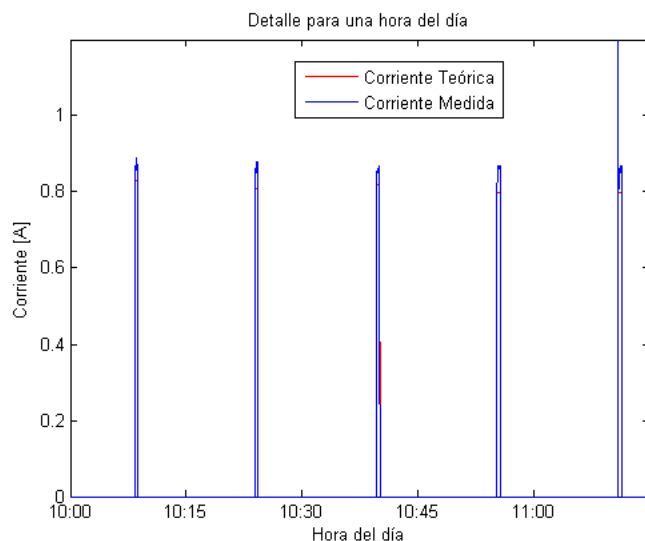


Figura 5.2: Corriente en actuador de azimuth Teórica y Medida Experimentalmente

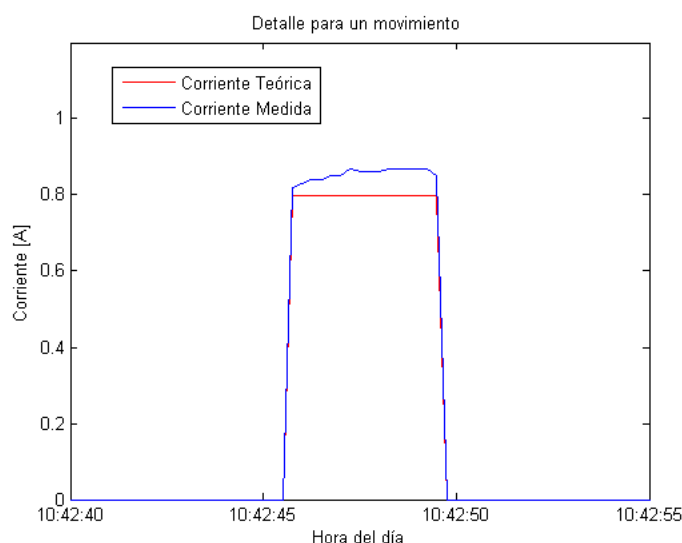


Figura 5.3: Corriente en actuador de azimuth Teórica y Medida Experimentalmente para un movimiento particular

De las figuras anteriores se puede ver que la predicción teórica es cercana a lo medido experimentalmente.

La diferencia entre ambas curvas se debe a que el modelo teórico desarrollado en el punto 3.2.1 es estático, es decir, simula un régimen permanente, por lo cual los transientes presentes al iniciar el movimiento no son entregados por la simulación. Sin embargo, cumplió su objetivo principal que era dimensionar los actuadores lineales a ocupar y predecir de forma cercana la energía ocupada en el seguimiento solar.

Para calcular ésta energía, es necesario aplicar la ecuación 3.23 y por lo tanto calcular cada uno de los términos que salen en ella.

Los circuitos de seguimiento solar consumen 15 [mA] cada uno de manera constante a 36 [V]. Los actuadores lineales se conectan a 36 [V] y las curvas de corriente de ambos ya son conocidas (figuras 4.12 y 4.13). La vuelta del colector de la posición de ocaso a la posición de amanecer tiene un consumo de corriente dado por la figura 4.14.

Con toda la información anterior, se puede calcular la energía para los seguimientos realizados entre los días 4 y 7 de Julio, dando

$$E_{TOTAL} = 14[Wh]$$

Si al colector se le colocara un ciclo de vapor y un generador de 1 [HP] nominales (o un motor Stirling de la misma potencia), entonces este consumo no sería mayor al 1 % de los 2500 [Wh] generados en un día soleado de Julio.

En verano, el colector debe alcanzar una elevación mayor ($\beta \sim 80 [^{\circ}C]$) por lo cual el consumo el actuador de elevación aumenta. Al mismo tiempo, el actuador de azimuth también demanda mayor corriente debido a la posición del colector.

Se simuló el comportamiento mecánico del colector el día 21 de diciembre (solsticio de verano) para conocer el consumo energético del sistema. La corriente consumida por el actuador lineal de azimuth se puede ver en la figura 5.4.

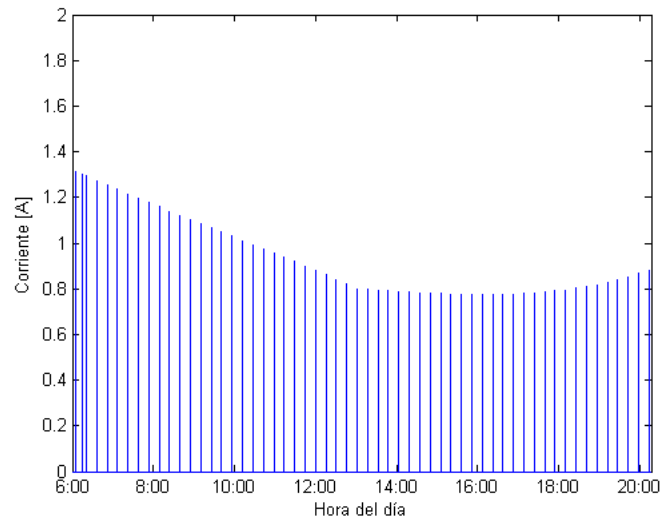


Figura 5.4: Corriente en actuador de azimuth teórica consumida el 21 de diciembre

En la simulación anterior se realizaron seguimientos cada 10 minutos, siendo cada seguimiento de 3 segundos de duración.

Es posible observar que el actuador de azimuth trabaja más tiempo que en invierno y que la corriente consumida por él es mayor.

También se simuló la vuelta del ocaso a la posición de amanecer, obteniéndose el gráfico de la figura 5.5.

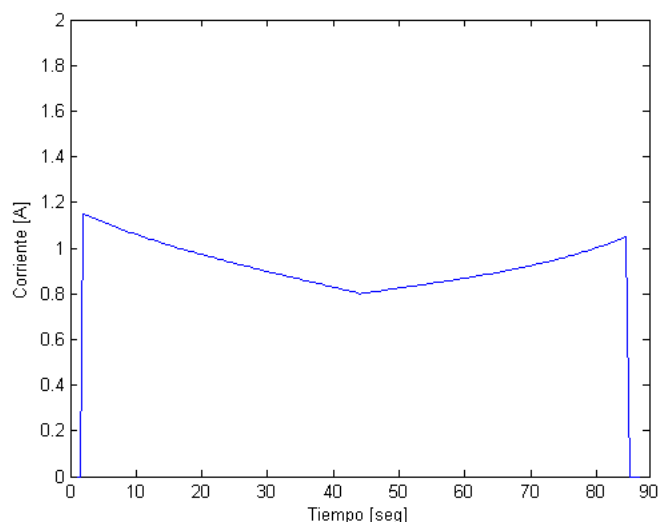


Figura 5.5: Corriente en actuador de azimuth teórica consumida en la vuelta del ocaso a la posición de amanecer el 21 de diciembre

Si se realiza el mismo cálculo energético que se realizó anteriormente, la energía consumida llega a 18 [Wh] lo cual no supera el 1 % de los 3500 [Wh] generados por este mismo generador de 1 [HP] el día indicado en condiciones normales de radiación.

5.2. Radiación incidente y temperatura en el foco

La temperatura encontrada en el receptor es alta, aún teniendo un reflectante bastante pobre en calidad. Esto se debe a dos factores relevantes, los cuales son el diámetro del colector y la buena aislación que ofrece la manta de lana mineral en el receptor.

El diámetro del colector y el reflectante tienen una relación directa, ya que mientras mejor es el reflectante, menor puede ser el diámetro para conseguir la misma concentración de energía (CR). Este es un factor determinante a analizar desde el punto de vista técnico y económico si se quiere construir cualquier tipo de concentrador solar.

La lana mineral impide que el receptor tenga pérdidas por convección en toda su estructura externa y parte de su cara frontal, resistiendo altas temperaturas y exposición constante a la intemperie.

Las temperaturas medidas experimentalmente y las esperadas teóricamente se pueden ver en las figuras 5.6 y 5.7. Las constantes que se utilizaron en las fórmulas 3.37, 3.38 y 3.39 para obtener las curvas teórica fueron: $\epsilon = 0,75$, $V = 2[m/s]$, $\rho = 0,7$, $A_{ac} = \pi(1,3)^2$, $A_r = \pi(0,15)^2$ y $A_1 = \pi(0,06)^2$.

La temperatura local y la radiación total sobre plano horizontal fueron obtenidas desde la central meteorológica del Departamento de Geofísica.

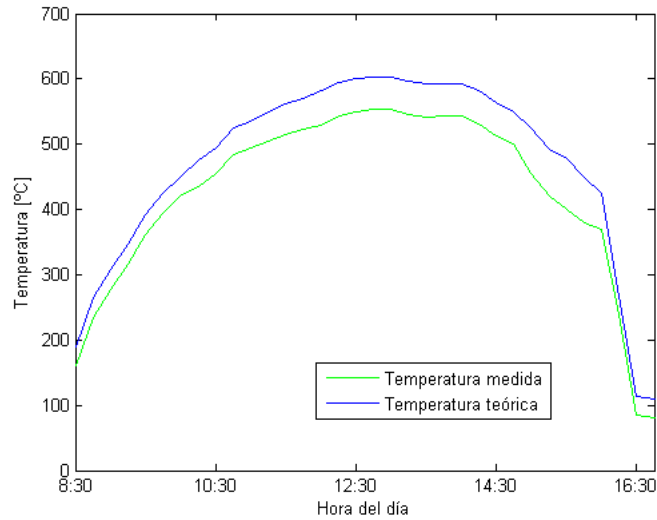


Figura 5.6: Temperatura medida en el receptor el 6 de junio

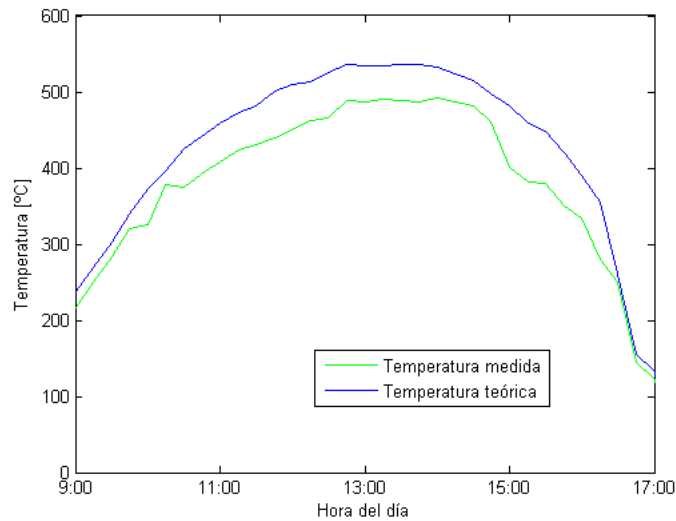


Figura 5.7: Temperatura medida en el receptor el 30 de julio

Las curvas teóricas y experimental son bastante cercanas, lo cual valida la construcción del receptor como prototipo de una *cavidad modificada* (ver parte 3.2.3).

La radiación incidente en el foco no es posible medirla con los instrumentos disponibles ya que es muy alta, sin embargo con los datos de temperatura medidos y la ecuación 3.35 se puede obtener la radiación incidente en el foco. Estos datos se pueden contrastar con la ecuación 3.34, donde teniendo la radiación directa y el CR del colector, se puede calcular la radiación incidente en el foco I_f teóricamente a lo largo del día.

Estas curvas se pueden observar en las figuras 5.8 y 5.9 para los días 6 de Junio y 30 de Julio.

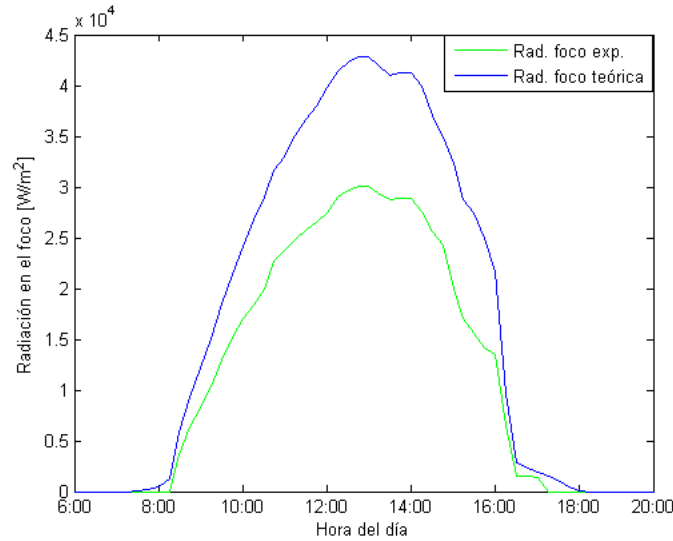


Figura 5.8: Radiación incidente en el foco teórica y experimental para el 6 de junio

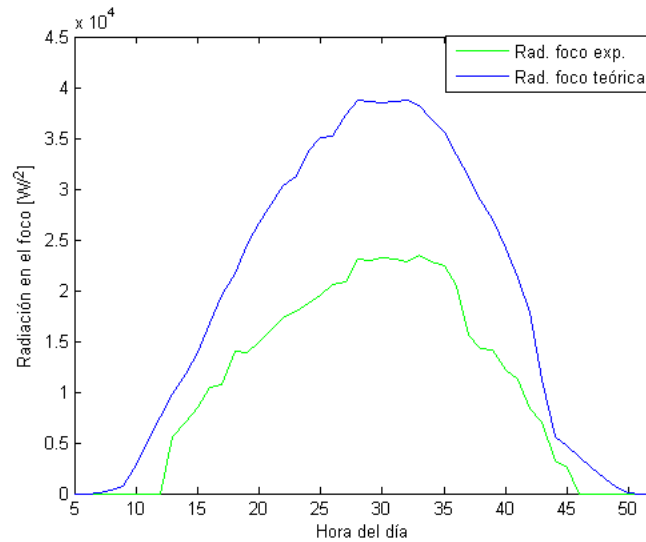


Figura 5.9: Radiación incidente en el foco teórica y experimental para el 30 de julio

La radiación incidente en el foco es extremadamente alta, lo cual es una propiedad exclusiva de este tipo de concentradores.

Algunos factores que pueden incidir en la diferencia teórica-experimental en las curvas de temperatura y radiación, son la forma del colector (punto (3) de la sección 3.2.2), la reflexibilidad ρ del papel reflectante y las mediciones de viento locales.

La forma del colector no es perfectamente parabólica, acentuándose este error hacia los extremos del colector y teniendo ésto como consecuencia que los rayos reflejados por la superficie externa no lleguen al foco. Lo anterior tiene como consecuencia que el área de aceptación del colector, y por lo tanto el CR, sea menor al estimado teóricamente.

La reflexibilidad del reflectante es teóricamente 0,7 según las tablas, pero al estar a la intemperie hace algunos años, este factor va disminuyendo.

Si se rehacen las curvas teóricas disminuyendo la razón de concentración CR en un 25 % y la reflexibilidad en un 14 %, entonces el resultado obtenido se puede ver en las figuras 5.10, 5.11, 5.12 y 5.13.

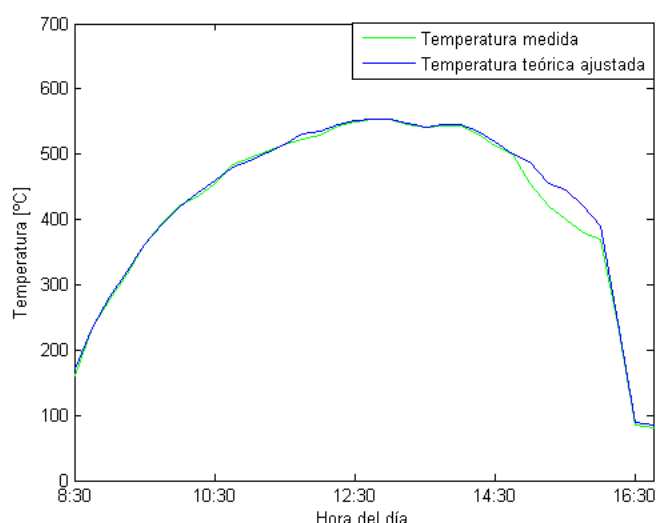


Figura 5.10: Temperatura en el foco medida experimentalmente y ajustada teóricamente para el 6 de junio

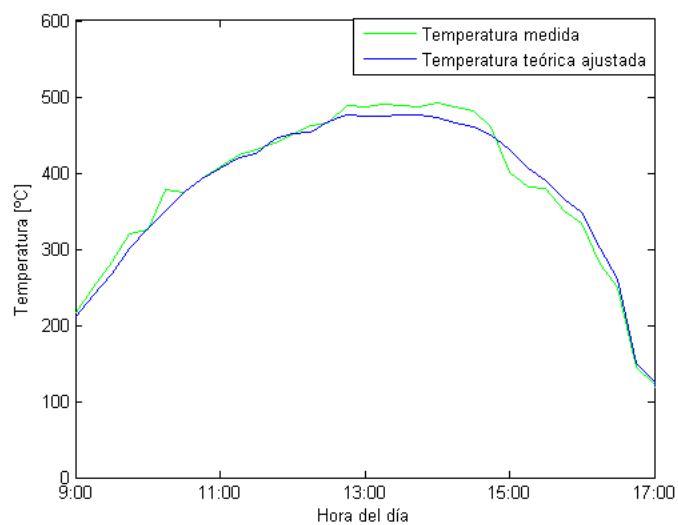


Figura 5.11: Temperatura en el foco medida experimentalmente y ajustada teóricamente para el 30 de julio

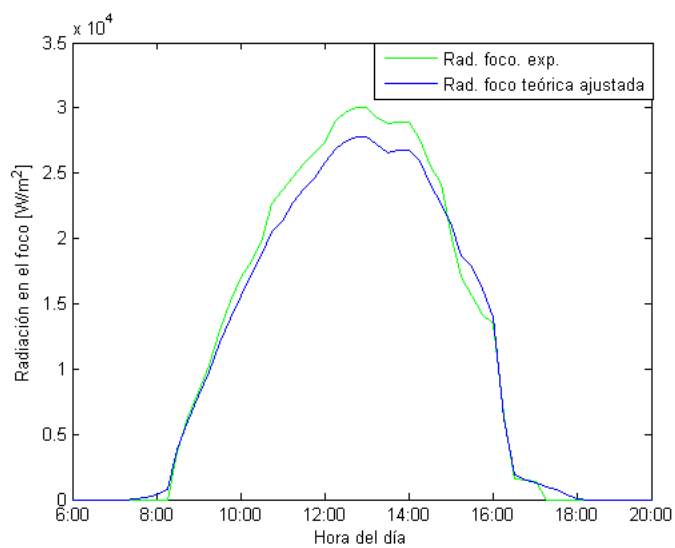


Figura 5.12: Radiación incidente en el foco obtenida experimentalmente y ajustada teóricamente para el 6 de junio

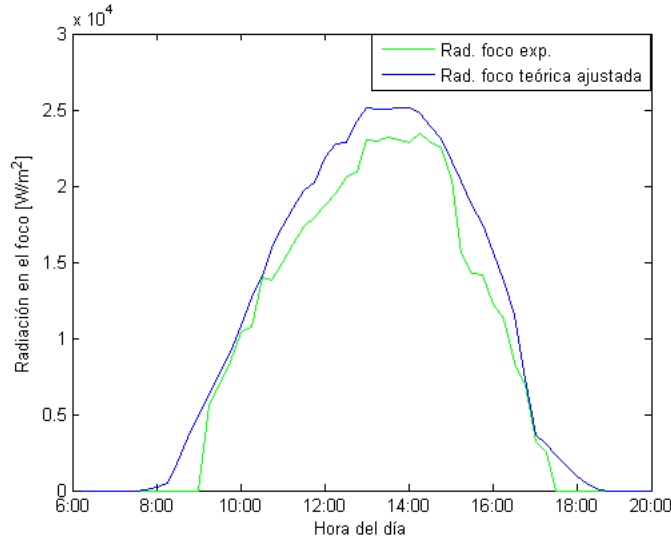


Figura 5.13: Radiación incidente en el foco obtenida experimentalmente y ajustada teóricamente para el 30 de julio

Se puede ver que el nuevo resultado teórico se ajusta a lo encontrado experimentalmente. Existe la posibilidad a que el reflectante tuviera una reflexibilidad ρ menor a 0.6 (con lo cual el área de aceptación sería mayor), sin embargo es poco probable dado que no se encuentra en malas condiciones.

Dado el ajuste anterior, se puede ahora calcular una nueva razón de concentración real CR para el colector, la cual (dado que se disminuyó el área de aceptación) será menor a la estimada teóricamente en la ecuación 3.24. La nueva CR será

$$CR = 180 \quad (5.1)$$

Esta razón de concentración es propia del colector en su estado actual y podría ser mejorada si se renueva el reflectante, ya que se lograría una zona focal de menor área.

El viento local es determinante en la temperatura que puede alcanzar el receptor, por lo cual es importante medirlo si se quiere tener más exactitud en la predicción teórica de la temperatura y en la estimación experimental de la radiación incidente en el receptor. Tener un anemómetro (aparato que mide la velocidad del viento) disponible en las mediciones escapaba de los alcances de la memoria y se midió en condiciones de viento bajo, no obstante, los resultados fueron satisfactorios.

Capítulo 6

Conclusiones

El sistema de seguimiento implementado tiene un consumo energético mínimo en comparación con la energía que podría generar el colector ya que su consumo diario máximo en el año no sobrepasa los 20 [Wh], lo cual no es mayor al 1 % de los 2500 [Wh-día] que un generador de 500 [W] nominales es capaz de generar.

Se desarrollaron simulaciones sobre radiación incidente en el foco y temperatura en el receptor, las cuales por ejemplo para el mes de julio arrojaron peaks máximos de 25000 [W/m^2] y 450 °C, respectivamente. Estas simulaciones fueron validadas experimentalmente y permitieron encontrar valores intrínsecos del colector como su razón de concentración CR .

Se construyó una montura de seguimiento altitud-azimut de tipo ecuatorial capaz de seguir el sol de manera autónoma y con un bajo gasto energético. Siendo esta montura de fácil construcción, no se requirió de mano de obra altamente calificada para su puesta en marcha.

La montura ocupa como tracción dos actuadores lineales, los cuales son motores de baja velocidad y alto torque. El sistema electrónico de seguimiento está hecho para trabajar con este tipo de motores y permite un seguimiento satisfactorio.

Fue posible construir un receptor adecuado para el colector solar en el sentido de captar un foco solar disperso y minimizar las pérdidas por radiación y convección. Para este receptor se hicieron simulaciones termodinámicas pudiéndose comprobar experimentalmente los resultados.

No fue posible medir directamente la radiación incidente en el foco ya que su valor es extremadamente alto, sin embargo se puede estimar a través de la medición de la temperatura en el receptor como se vio en el punto 5.2.

Las simulaciones mostradas en el punto 3.2.2, además de simular de manera efectiva el problema desarrollado en esta memoria, son aplicables a otros sistemas de colectores solares como los colectores cilindro- parabólicos o cocinas solares. Esto se debe a que su formulación fue general y basta cambiar la parametrización de la superficie para obtener nuevos resultados.

Se propone como trabajo futuro los siguientes items:

- Determinar experimentalmente en forma precisa la capacidad de concentración CR del colector y la reflectancia ρ del papel reflectante con que cuenta actualmente.
- Desarrollar algún medio de conversión de energía solar a eléctrica, ya sea mediante un ciclo de vapor o un motor Stirling.
- Implementar un control y monitoreo de tipo remoto para tener acceso a información del sistema a tiempo real y dar acciones de mando desde cualquier lugar con acceso a Internet.
- Instalar celdas solares fotovoltaicas que recarguen constantemente las baterías que alimentan los motores, para así tener un sistema de seguimiento autónomo.

Bibliografía

- [1] Duffie, J. , Beckman, W., *Solar Engineering of Thermal Processes* , John Wiley & Sons, 1980 .
- [2] Sarmiento, P., *Energía Solar: aplicaciones e ingeniería*, Ediciones Universitarias de Valparaíso, 1980.
- [3] Newton, C., *A concentrated solar Thermal Energy System*, The Florida State University, 2007.
- [4] Kalogirou, S., *Solar Thermal Collector and Applications*, Progress in Energy and Combustion Science 30 (2004) 231-295.
- [5] Kreith and Kreider, *Principles of Solar Engineering*, McGraw-Hill, 1978.
- [6] Comisión Nacional de Energía, *Irradiancia Solar en territorios de la República de Chile*
- [7] Timoshenko S.and Young D., *Engineering Mechanics*, McGraw-Hill, 1956.
- [8] Hession, P., Bonwick, W., *Experience with a Sun Tracker System*, Solar Energy, Vol. 32, 1984.
- [9] Sandia National Laboratories, *Concentrating Solar Power and Sun Lab*.
<http://energy.lanl.gov/sunlab/>.
- [10] Lucifredi, A. et al., *Theoretical and Experimental Study of Parabolic Troughs and Parabolic Dish Concentrators with Plane Absorbers*, Sun II: proceeding of the International Solar Energy Society, 1979.
- [11] Harris, J., Duff, W., *Focal plane flux distributions produced by solar concentrating reflectors*, Solar Energy, Vol.27, 1981.
- [12] Evans, D., *Solar Energy Handbook*, Chapter 9, Mc-Graw Hill, 1981.
- [13] Alata, M. et al., *Developing a multipurpose sun tracking system using fuzzy control*, Energy Conversion and Management 46 (2005) 1229-1245.
- [14] Sendhil, N. et al., *Comparison of receivers for solar dish collector system*, Energy Conversion and Management 49 (2008) 812-819.
- [15] Kaushika, N. et al., *Performance of a low cost solar paraboloid dish steam generating system*, Energy Conversion and Management 41 (2000) 713-726.

- [16] Red Rock Energy, *LED3x Solar Tracker*. <http://www.redrok.com>.
- [17] Ultra Motion, *Linear actuator design*. <http://www.ultramotion.com>.

Apéndice A

Planos de piezas y ensamblajes de la montura solar

Para facilitar el entendimiento del funcionamiento de la montura solar y su posible reproducción en el futuro, se adjuntan los planos de cada pieza y los planos de ensamblaje en forma digital en un CD que se puede encontrar en la contratapa de esta memoria.

Además de los planos, también se adjuntan las simulaciones 3D del colector, con las cuales se puede tener una visión real de éste y da el espacio para introducir posibles mejoras en el diseño.

Todos los archivos están en formato de *Solid Edge*, versión *Estudiante*, el cual es posible encontrar en los computadores del departamento de Ingeniería Mecánica.

Para abrir la simulación 3D del conjunto colector-montura, se debe entrar en el CD a la carpeta *Montura solar* y luego a la carpeta *Modelo 3D* . Aquí debe abrir con *Solid Edge* el archivo **ConcentradorSolarV2**.

Para encontrar el plano de alguna pieza se debe entrar en el CD a la carpeta *Montura solar* y luego a la carpeta *Planos*. Aquí cada archivo tiene el nombre de la pieza que representa de forma clara y sin abreviaciones.

Para ver algún ensamblaje se debe entrar en el CD a la carpeta *Montura solar* y luego a la carpeta *Ensamblajes*. En esta carpeta, cada archivo tiene el nombre del ensamblaje que representa de forma clara y sin abreviaciones.

Es importante destacar que un usuario nivel intermedio de *Solid Edge* puede obtener, desde la simulación 3D, cualquier plano de pieza o ensamblaje que desee.

Apéndice B

Programas realizados para simulación

Las diferentes curvas teóricas encontradas en la memoria se basan en simulaciones desarrolladas en *Matlab 7.0*. Estas simulaciones se pueden encontrar en el CD que se adjunta en la contratapa de la memoria.

Los archivos son tres:

(1) Formación del foco

Esta simulación es la base del capítulo 3.2.2. Se puede encontrar en el CD en la carpeta *Simulaciones* con el nombre *foco.m*.

Las variables importantes en el programa son

- (a) dia : día del año.
- (b) phi : latitud geográfica.
- (c) w: ángulo horario.
- (d) beta_parabola : ángulo θ de la parábola.
- (e) gama: ángulo γ de la parábola.
- (f) radio_parabola: radio r_c del colector.
- (g) c_parabola: altura h_c del colector.
- (h) zo: distancia del plano que se quiere visualizar (podría ser el plano focal).
- (i) lambda_rayo: ángulo δ del cono reflejado.
- (j) alpha: coeficiente ρ del material reflectante.

(2) Cálculo de temperatura en el foco y radiación incidente en él

Esta simulación es la base de los capítulos 3.2.3 y 5.2. Se puede encontrar en el CD en la carpeta *Simulaciones* con el nombre *potencia_y_temperatura_foco.m*.

Las variables importantes en el programa son

- (a) η_a : dispersión de flujo en la atmósfera η_a .
- (b) η_r : pérdidas en el reflectante η_r .
- (c) viento: rapidez del viento en m/s .
- (d) area_colector: área de aceptación del colector.
- (e) ρ : reflexibilidad del material reflectante ρ .
- (f) A.1: área sin aislante del receptor.
- (g) Tamb: temperatura ambiente en $^{\circ}C$.
- (h) eff: emitancia del receptor
- (i) Radiacion_incidente: radiación directa incidente.
- (j) T_foco: temperatura del foco.

(3) Cálculo de fuerzas aplicadas, largos alcanzados y energías consumidas por los motores

Esta simulación es la base del capítulo 3.2.1. Se puede encontrar en el CD en la carpeta *Simulaciones* con el nombre *fuerza.m*.

Las variables importantes en el programa son

- (a) foco: distancia focal.
- (b) I_{vv} y I_{ww} : momentos de inercia del colector.
- (c) m_s: masa del receptor en kg .
- (d) dia: día del año.
- (e) phi: latitud.
- (f) Fuerza_elevacion_real: fuerza que ejerce el actuador de elevación.
- (g) Fuerza_azimuth_real: fuerza que ejerce el actuador de azimuth.