



Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla

Centro Interdisciplinario de Posgrados
Investigación y Consultoría
Doctorado en Ingeniería Mecatrónica

“Diseño de mecanismo de seguimiento solar para generación de electricidad mediante disco parabólico y fotoceldas de alta eficiencia”

Tesis que para obtener el grado de Doctor en
Ingeniería Mecatrónica

Presenta

Víctor Manuel Herrera Jiménez

Director de tesis

Dr. Rafael García Gutiérrez

Puebla, México.

2016



UPAEP – Secretaría General

Dirección General de Apoyos Académicos

Dirección del Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación.

Biblioteca Central - **Karol Wojtyla**

Tesis Digitales Restricciones de uso:

DERECHOS RESERVADOS ©

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de textos, imágenes, gráficas, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente de donde la obtuvo mencionando el autor o autores involucrados en el documento.

Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

CARTA DE AUTORIZACIÓN

Hermosillo, Sonora 27 de Mayo del 2016

A quien corresponda:

Por medio de la presente, me permito informar que he revisado en su totalidad los capítulos correspondientes al documento de tesis, en mi calidad de Director de tesis del M.C. Víctor Manuel Herrera Jiménez con matrícula 89500023, ID 242613, alumno del programa de doctorado en Ingeniería Mecatrónica de la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, UPAEP.

El contenido del citado documento, cuyo título es **“Diseño de mecanismo de seguimiento solar para generación de electricidad mediante disco parabólico y fotoceldas de alta eficiencia”**, ha sido revisado exhaustivamente y el maestro Herrera ha atendido oportunamente las observaciones y sugerencias correspondientes.

Por lo tanto, expreso que el documento cumple con la calidad en cuanto a formato y contenido necesario para que se continúen con los trámites administrativos pertinentes.

Sin otro particular, manifiesto mi disponibilidad para cualquier duda o aclaración a la presente.

Atentamente

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Rafael García', is written over a horizontal line.

Dr. Rafael García Gutiérrez

Director de Tesis

Agradecimientos.

A mis padres, Jesús María Herrera Robles y María Del Rosario Jiménez Herrera, por ser base de mi desarrollo humano y profesional.

A mis hermanos, Jesús, Rosalba, Tita, Rosario, Martin, Efraín, Francisco y Germán.

A mis amigos y compañeros, Beatriz, Flor, Aracely, Carlos, Pacheco, Cuamea, Ricardo, Claudio, Aureliano, Victor, Evaristo e Iván por alentarme en mi desarrollo personal y profesional.

A Rafael García, por darme la oportunidad de trabajar con él y por su capacidad crítica e intelectual.

A maestros y compañeros de Doctorado por ser parte de mi desarrollo profesional.

A la Universidad de Sonora por darme la oportunidad de desarrollarme en una de las profesiones más gratificantes que puede existir y que sin ella este proyecto no sería posible.

Índice

1. Introducción.	1
1.1. Antecedentes.	2
1.2. Definición del problema.	3
1.3. Objetivos.	5
1.3.1. Objetivo general.	5
1.3.2. Objetivos particulares.	5
1.4. Alcances.	6
1.5. Justificación.	6
2. Geometría solar.	8
2.1. Declinación solar.	9
2.2. Posición solar.	12
2.3. Ángulo cenit.	13
2.4. Ángulo azimutal.	15
2.5. Algoritmo de posición solar.	17
2.6. Diseño mecánico.	24
2.6.1. Proceso de diseño mecánico de acuerdo a Shigley.	24
2.7. Herramientas y recursos de diseño.	28
2.7.1. Herramientas computacionales.	29
2.8. Volumen finito.	30
2.9. Elemento finito.	31
2.10. Seguidores Solares.	32
2.11. Automatización y control.	33
2.11.1 Controladores Lógicos Programables.	33
2.12. Sensores.	34
2.12.1. Encoders Absolutos.	34
2.12.2. Sensores de efecto Hall.	34
3. Desarrollo de la investigación.	35
3.1. Consideraciones de diseño del seguidor.	35
3.2. El diseño.	35
3.3. Datos del diseño.	36
3.4. Equipo computacional.	36

3.5. Análisis de arrastre de viento (Volumen Finito).....	37
3.6. Análisis estructural de elementos finitos.	39
3.7. Análisis de movimiento del modelo.	40
3.8. Algoritmo de seguimiento.	40
3.9. Diseño y elementos de Automatización.....	41
4. Análisis de resultados	44
4.1. Análisis de movimiento del seguidor.....	44
4.2. Obtención de presiones mediante volumen finito.....	46
4.3. Resultados y análisis mediante elementos finitos.....	47
5. Conclusiones.....	50
6. Discusión	50
Referencias	51
Apéndice 1	53
Apéndice 2	59
Apéndice 3. Productividad Académica	61
Apéndice 4.....	65

Lista de figuras

Figura 2.1 Geometría Solar.	8
Figura 2.2 Ángulo de declinación solar en distintas estaciones	9
Figura 2.3 Variación de la trayectoria aparente del sol con las estaciones del año. ...	10
Figura 2.4 Declinación solar.	11
Figura 2.5 Ángulos cenital, acimutal y altura solar	12
Figura 2.6 Ángulo horario solar.	13
Figura 2.7 Sistema de referencia para el ángulo cenital, al mediodía solar	13
Figura 2.8 Sistema de referencia para el cálculo del ángulo acimutal.	15
Figura 2.9 Variación de ángulos zenit y azimut con las estaciones del año.	16
Figura 2.10 Fases del proceso de diseño que reconocen múltiples retroalimentaciones e iteraciones.	27
Figura 2.11 Sensor de efecto hall	34
Figura 3.1 Modelo virtual final seguidor.	36
Figura 3.2 Mallado de celdas para volumen finito.	37
Figura 3.3 Mallado y dominio computacional del estudio de fluidos.	38
Figura 3.4 Trayectoria del fluido en el estudio de volumen finito para el escenario 1. .	38
Figura 3.5 Malla vista de la parte posterior a la estructura.	39
Figura 3.6 Malla vista desde la parte superior de la estructura.	40
Figura 3.7 Esquema de integración de automatización de seguimiento.	43
Figura 4.1 Relación de carga dinámica en el tiempo a una velocidad de 6mm por segundo	44
Figura 4.2 Relación de torque en el tiempo a una velocidad de 3/102 revoluciones por minuto	45
Figura 4.3 Relación ángulo azimut y tiempo a velocidad constante de 3/102 revoluciones por segundo.	45
Figura 4.4 Relación ángulo zenit y tiempo a velocidad constante	45

Figura 4.5 Ajuste de polinomio al ángulo zenit con respecto a un movimiento constante.	46
Figura 4.6 Presiones sobre estructura debido al viento	46
Figura 4.7 Distribución de deformaciones en estructura escenario 1.	47
Figura 4.8 Estructura en escalas de colores que muestra el factor de seguridad.	47
Figura 4.9 Ensamble del diseño de la base del seguidor.	49
Figura 4.10 Resultados de deformaciones sobre la base del seguidor	49

Lista de tablas

Tabla 3.1. Escenarios de estudio para análisis de volumen finito	37
Tabla 3.2. Información geográfica del laboratorio de energía de Hermosillo.	41
Tabla 4.1. Resultados de deformaciones para los 4 escenarios por los efectos de la gravedad y el viento	48
Tabla 4.2 Resultados de deformaciones para los 4 escenarios por efecto de la gravedad.	48
Tabla A1. Términos periódicos de la Tierra.	53
Tabla A2. Términos periódicos para la Inclinación en Longitud y Oblicuidad.	59

1. Introducción.

La urgencia de reducir la emisión de gases de efecto invernadero aunado al encarecimiento y escasos de los combustibles fósiles hace necesario el desarrollo de nuevas fuentes de energía más amigables con el medio ambiente. La generación de electricidad mediante fuentes renovables de energía es una de las alternativas más factibles. Dentro de ellas la energía solar por su abundancia y disponibilidad es la más prometedora [Lewis, 2007]. Para generación de potencia las principales tecnologías solares son la térmica y la fotovoltaica.

El presente proyecto contempla el diseño de un sistema de generación de energía eléctrica basado en el prototipo desarrollado por investigadores de la Universidad de Arizona [Butler et al, 2011] [Angel et al, 2011] [Coughenour et al, 2013]. El sistema está compuesto por un concentrador solar de disco parabólico y un sistema fotovoltaico de concentración avanzado integrado por celdas de triple unión de alta eficiencia y dispositivos termoiónicos [Angel, 2013]. Para mejorar la distribución del flujo de radiación solar y minimizar los gradientes de temperatura sobre las celdas solares se añade un sistema óptico secundario del tipo de Köhler [Angel et al, 2011] [Coughenour et al, 2014]. Para fines de optimizar el diseño del sistema se montan sobre una sola estructura de seguimiento solar, 12 espejos de disco parabólico, con sus respectivas unidades de conversión de potencia. La ventaja de este arreglo, es la reducción del costo específico del sistema de seguimiento, y la posibilidad de contar con unidades de enfriamiento centralizadas. Para ello se debe diseñar el mecanismo de seguimiento solar y estudiar los efectos de las cargas de viento y gravedad para determinar las deformaciones de la estructura de soporte de los espejos y las unidades de conversión de potencia.

Con base en lo anterior, este trabajo de investigación se enfoca en el estudio de las deformaciones causadas por la acción de la gravedad y la fuerza de arrastre del viento mediante técnicas numéricas de Elemento Finito (FEA) y volumen finito (CFD) utilizando el software SolidWorks.

1.1. Antecedentes.

La tecnología para captación solar usualmente toma una de las siguientes dos formas: el cuántico, como en celdas fotovoltaicas (PV), o el térmico en donde se utiliza la radiación solar como fuente de calor. Los procesos cuánticos impulsan altas eficiencias teóricas, pero en la práctica se limitan a pequeños espectros de energía; en cambio, en los procesos térmicos la eficiencia es baja, pero existe la ventaja de usar energía del espectro solar completo. Una combinación simple de estos dos procesos fracasa debido a que las celdas PV pierden su eficiencia rápidamente a temperaturas elevadas, mientras que a bajas temperaturas las celdas térmicas pierden eficiencia. La emisión termoiónica mejorada por efecto fotoeléctrico (PETE, por sus siglas en inglés) es un método de captación de energía solar que utiliza la naturaleza cuántica de los fotones solares en conjunto con energía térmica para generar electricidad a temperaturas compatibles con máquinas térmicas solares. El método consiste en utilizar un cátodo semiconductor separado de un ánodo por una brecha de vacío. Los fotones incidentes excitan los electrones en la banda de conducción del cátodo. Emiten al vacío y son captados por el ánodo generando un voltaje. La separación física entre el ánodo y el cátodo permite una gran diferencia de temperatura, reduciendo la corriente inversa generada térmicamente la cual limita a las celdas PV a altas temperaturas. Estos dispositivos son candidatos ideales para aplicaciones solares de altas concentraciones debido a que pueden operar a elevadas temperaturas de una forma eficiente. Derivado del proyecto de Laboratorios Nacionales de Sistemas de Concentración Solar y Química Solar que financió CONACYT en Conjunto con la UNAM y la Universidad de Sonora, se construyó el Campo de Pruebas de Heliostatos (CPH) en instalaciones de la UNISON en Hermosillo, Sonora.

Se utiliza un nuevo tipo de unidad de generación de energía eléctrica con un sistema óptico de concentración solar de gran tamaño en forma de plato parabólico y células fotovoltaicas de triple unión de alta eficiencia. La tecnología ha sido desarrollada por el Dr. Roger Angel, de la Universidad de Arizona (UA), con dos elementos clave: una manera fácil de moldear grandes espejos de vidrio paraboloídes, y un sistema óptico secundario para distribuir la luz solar altamente concentrada a una compacta célula matriz.

El nuevo concepto de generación de potencia eléctrica con fotoceldas de alta eficiencia y concentración solar se ha demostrado a escala completa en las pruebas realizadas en la Universidad de Arizona, con un espejo de 10 m² de la UA Mirror Lab en Tucson. Genera una potencia aproximada a 2.5 kW_p. Las dos tecnologías propuestas para la producción de potencia eléctrica son las fotoceldas de alta eficiencia y el generador termoiónico avanzado.

El objetivo original del proyecto desarrollado en la Universidad de Arizona (UA) consistía en dar un nuevo enfoque al desarrollo de esta tecnología para competir comercialmente con combustibles fósiles cuando se realice su implementación a gran escala. Este sistema combina las mejores características de los métodos de fotovoltaicos (PV) y concentración solar de potencia (CSP). Los grandes espejos de vidrio se establecen en el desierto sobre montajes de seguimiento solar, como en los sistemas CSP, pero estos espejos están diseñados para llevar la luz a un foco local, donde la óptica transfiere la luz solar concentrada a células fotovoltaicas muy eficientes (> 40%). Al igual que los paneles fotovoltaicos, estas molduras generan electricidad directamente, pero son 1000 veces más pequeñas y cuestan diez veces menos en términos de la salida de energía proporcionada. Para una determinada inversión en los espejos y las estructuras de seguimiento solar, producen el doble de energía que los sistemas de turbinas de vapor, lo que reduce el costo del sistema, además no consumen agua neta, una consideración importante en regiones desérticas.

En el CPH se han estado probando diferentes diseños de heliostatos que han sido desarrollados por personal de ambas instituciones (UNAM y UNISON). Se han logrado establecer los principales parámetros de diseño así como sus sistemas de control y seguimiento.

1.2. Definición del problema.

La acción de la fuerza de gravedad en la estructura es notoriamente reflejada en deformación. El método de elementos finitos para el análisis estático de la estructura se desarrolla de manera general estableciendo propiedades del material, sujeciones del modelo y fuerzas actuantes en el modelo, como lo es el peso de la estructura y la fuerza debida a la acción del

viento. El cálculo de deformaciones es el principal objetivo del análisis estático mediante elementos finitos, en (1.1) se muestra la expresión para la obtención de deformaciones (Tirupathi R. y Ashok D., 2002), donde K es la matriz de rigidez global la cual contiene principalmente los grados de libertad de cada elemento, F es la matriz que contiene las magnitudes de fuerzas localizadas en cada nodo de los elementos y Q es el vector que contienen los desplazamientos de todos los nodos de un elemento.

$$KQ = F \quad (1.1)$$

El cálculo de esfuerzo en los elementos del estudio estático se generan una vez obtenidas las deformaciones, mediante (1.2) (Tirupathi R. & Ashok D., 2002) se obtienen los esfuerzos, donde σ es la matriz que contiene los esfuerzos de cada elemento, D es la matriz dada por las propiedades del material (Modulo elástico y relación de Poisson), B es la matriz de deformación unitaria y q es el vector de desplazamiento de los nodos de un elemento.

$$\sigma = DBq \quad (1.2)$$

Una vez obtenidos los resultados de esfuerzo y deformación es importante calcular el factor de seguridad en la estructura. En (1.3) se muestra la expresión para el cálculo del factor de seguridad, donde σ_{limite} es el esfuerzo límite permisible y σ es el esfuerzo obtenido en los elementos de la estructura. Se busca encontrar una relación mayor a 2 en relación a la deformación plástica.

$$FOS = \frac{\sigma_{\text{limite}}}{\sigma} \quad (1.3)$$

Debido a que el seguidor trabajara a la intemperie, además de los esfuerzos y deformaciones generados por la gravedad, debe soportar cargas relacionadas con el ambiente, especialmente aquella relacionada con la fuerza de arrastre del viento. Si consideramos al viento como un fluido incompresible, su movimiento estará determinado por la ecuación de Navier-Stokes (N-S):

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -u\nabla u + v\nabla^2 u + \frac{\nabla p}{\rho} + f \quad (1.4)$$

En la cual la aceleración de una partícula de un fluido $\partial u / \partial t$ puede ser determinada por los efectos de la advección $u\nabla u$, difusión $v\nabla^2 u$, gradiente de presión $\nabla p / \rho$ y la fuerza de un cuerpo f , lo cual es posible derivar directamente de los principios de conservación de masa, momento y energía.

Tomando en consideración los efectos de la gravedad y el viento sobre la estructura, el problema se define como:

Diseñar un seguidor solar con 12 unidades de generación de potencia y 2 grados de libertad capaz de producir hasta 9.6 kilowatts-hora y que tenga una deformación máxima de 8mm en funcionamiento con corrientes de viento hasta 32 km/h y con una resistencia en estado de reposo a la deformación plástica con corrientes de viento de hasta 132 km/h.

1.3. Objetivos.

1.3.1. Objetivo general.

Diseñar un sistema de seguimiento solar para producción de energía eléctrica mediante disco parabólico y fotoceldas de alta eficiencia.

1.3.2. Objetivos particulares.

1. Diseño mecánico de la estructura para soportar 12 unidades de potencia con una capacidad máxima de 9.6 kilowatts-hora. Cada unidad de potencia está compuesto de un espejo parabólico de 1.65 x 1.65 metros, un sistema de enfriamiento y, un sistema de celdas solares de alta eficiencia.
2. Análisis estructural del mecanismo de seguimiento tomando en cuenta la velocidad del viento en escenarios de reposo y operación de hasta 140 km por hora y por debajo de los 32 km por hora respectivamente, además la deformación del sistema debe

cumplir con un ángulo máximo de apertura (error de concentración) a una velocidad por debajo de 32 km por hora.

3. Diseño de un sistema de Automatización de seguimiento solar.

1.4. Alcances.

Al concluir el proyecto se espera contar con concentradores de disco parabólico que harán un total de 32 m² de captación de luz solar. Estos concentradores tendrán en funcionamiento doce unidades de generación de potencia eléctrica basados en fotoceldas de alta eficiencia y una de efecto termoiónico. Se espera desarrollar el sistema de refrigeración de las unidades de generación de potencia que permita alcanzar la máxima eficiencia de las fotoceldas. El desarrollo de esta tecnología en conjunto con la Universidad de Arizona originará una adjudicación de esta tecnología solar en la industria energética nacional. Se espera que este sistema genere un máximo de 9.6 kilowatts-hora de energía eléctrica.

1.5. Justificación.

La fuente de energía renovable más importantes que existe en nuestro planeta, es el sol, por ende es de vital importancia que se enfoque la investigación científica en crear nuevo conocimiento y tecnologías para aprovechar esta energía.

Los recursos fósiles son un recurso finito, un bien valioso que sirve además de manufacturar plásticos para muchos otros productos, lo que claramente presenta un mejor uso que la combustión. El desarrollo de tecnologías de aprovechamiento va en el sentido de aumentar la eficiencia para aprovechar al máximo la radiación solar y mejorar los mecanismos para su funcionamiento como son los seguidores solares, que son parte muy importante en el buen desempeño de la captación solar y la supervivencia física de esta tecnología debido a que funcionan a la intemperie.

Los principales desafíos tecnológicos para incrementar el uso de las tecnologías solares radican en dos ejes de acción, incrementar la eficiencia de conversión y disminuir el costo de la tecnología. Uno de los causantes principales de pérdida de eficiencia en los dispositivos

solares son los errores en el seguimiento solar causados por deformaciones mecánicas o errores de manufactura. Desarrollar sistemas de seguimiento solar muy precisos es costoso. Es por ello que se debe de encontrar nuevas soluciones de alta precisión y bajo costo. Ese proyecto de tesis busca desarrollar un sistema fotovoltaico de concentración de disco parabólico, haciendo énfasis en el diseño mecánico del sistema de seguimiento solar mediante técnicas de elemento finito.

2. Geometría solar.

La tierra gira en una órbita elíptica alrededor del sol, tal como se muestra en la figura 2.1. Donde el sol se ubica en uno de los focos de dicha elipse. El plano en el cual se mueve la tierra se conoce como plano de la eclíptica. La distancia promedio entre la tierra y el sol es de 1.496×10^{11} metros, con una variación de $\pm 1.7\%$ a lo largo del año. La distancia más larga, o afelio, ocurre el día 4 de julio y la más corta, o perihelio, ocurre el día 4 de enero.

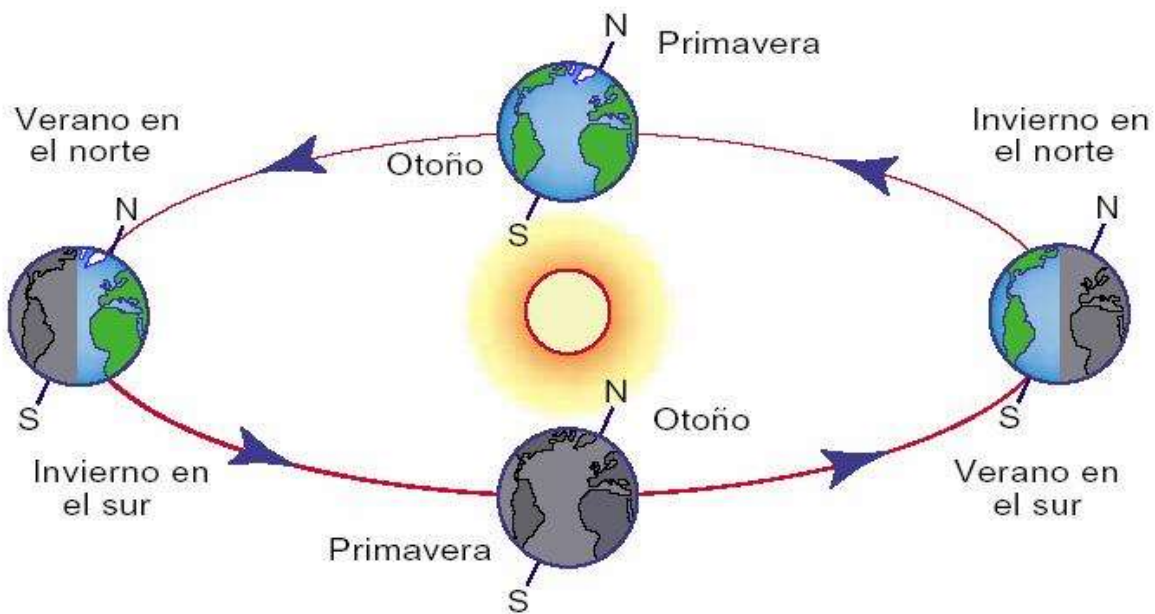


Figura 2.1 Geometría Solar.

Una peculiaridad muy importante del movimiento de la tierra alrededor del sol es que el eje de rotación de esta, llamado eje polar, no es perpendicular al plano de la eclíptica, el eje polar hace un ángulo de 23.45° con respecto al eje eclíptico, el cual es perpendicular al plano de la eclíptica, esto se puede apreciar en la figura 2.2. El eje de la tierra se mantiene siempre apuntando en la misma dirección a lo largo del año.

Debido a que la distancia de la tierra al sol es muy grande comparada con el tamaño de ambos en algunos cálculos se pueden considerar como objetos puntuales, sin embargo, en otros casos no es conveniente hacer dicha consideración. De acuerdo a las dimensiones presentadas

en la figura 2.2, se obtiene que el sol subtiende respecto a la tierra un semiángulo de 4.7 mrad.

2.1. Declinación solar.

Debido a que la tierra gira sobre sí misma y también gira alrededor del sol los rayos solares que inciden sobre la superficie de la tierra varían en ángulo a lo largo del día y también a lo largo del año, dando origen al día y la noche y a las diferentes estaciones del año.

El plano ecuatorial de la tierra es perpendicular al eje polar. El ángulo que hace el vector que une los centros de la tierra y del sol con el plano ecuatorial recibe el nombre de declinación solar (δ). Se define como positivo cuando se mide hacia el norte y negativo hacia el sur. Como se puede observar en la figura 2.2, el ángulo de declinación solar toma el valor de 23.45° en el solsticio de verano (21 de junio) y de -23.45° en el de invierno (21 de diciembre). En los equinoccios de primavera (21 de marzo) y de otoño (21 de septiembre) su valor es cero.

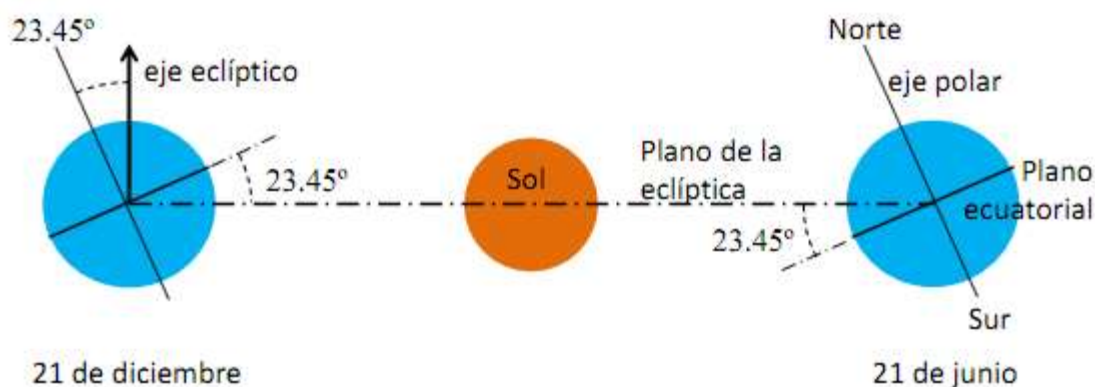


Figura 2.2 Ángulo de declinación solar en distintas estaciones¹.

Si esto es observado desde la tierra da la impresión de que a lo largo del año el sol se desplaza de manera continua en el cielo cambiando su trayectoria con los días, a veces es visto al

¹ C. A. Arancibia y D. Riveros. Notas de curso: Aplicaciones térmicas de la energía solar; Centro de Investigación en Energía, UNAM, 2012.

medio día muy acostado hacia el horizonte y a veces mucho más vertical, tal como se muestra en la figura 2.3.

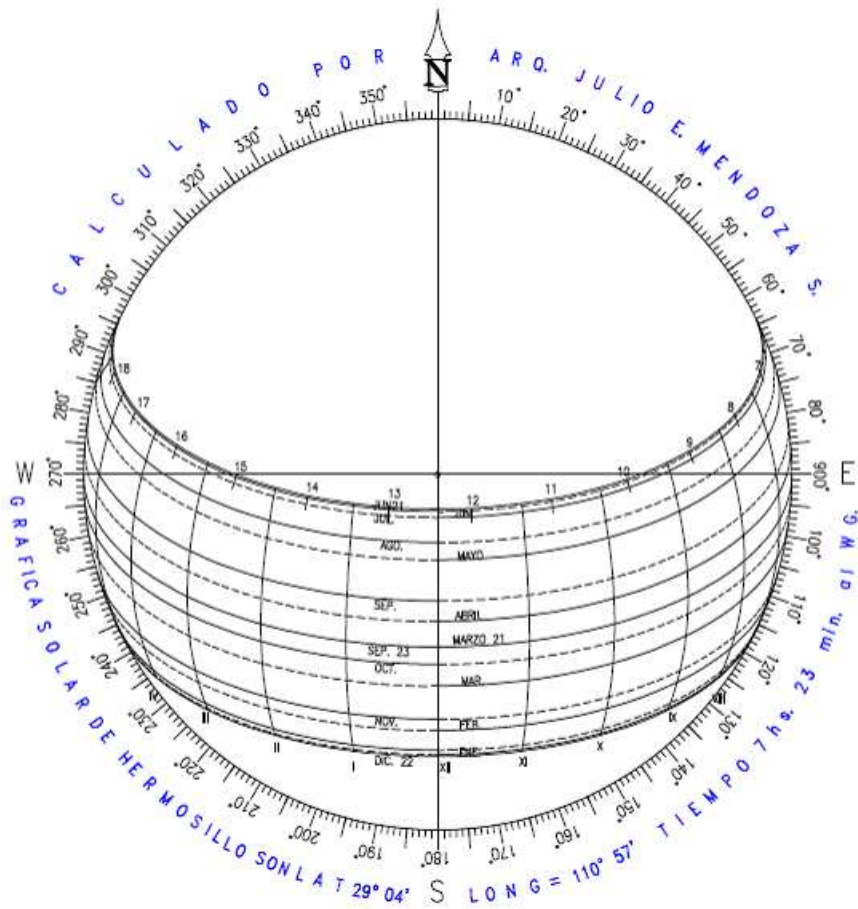


Figura 2.3 Variación de la trayectoria aparente del sol con las estaciones del año.

En particular, en el ecuador se nota el sol hacia el sur, en el invierno y hacia el norte en el verano. Específicamente, en el ecuador el ángulo que hace el sol con respecto a la vertical al medio día es igual al ángulo de declinación solar. Desde el centro o sur de México, es decir, por debajo del trópico de cáncer (latitud igual a 23.45°) se ve el sol hacia el sur durante la mayor parte del año y ligeramente hacia el norte o casi vertical en el verano. En cambio, en los estados del norte del país, por arriba del trópico de cáncer, siempre la percepción es hacia el sur al mediodía. Esto se puede apreciar en la figura 2.4.

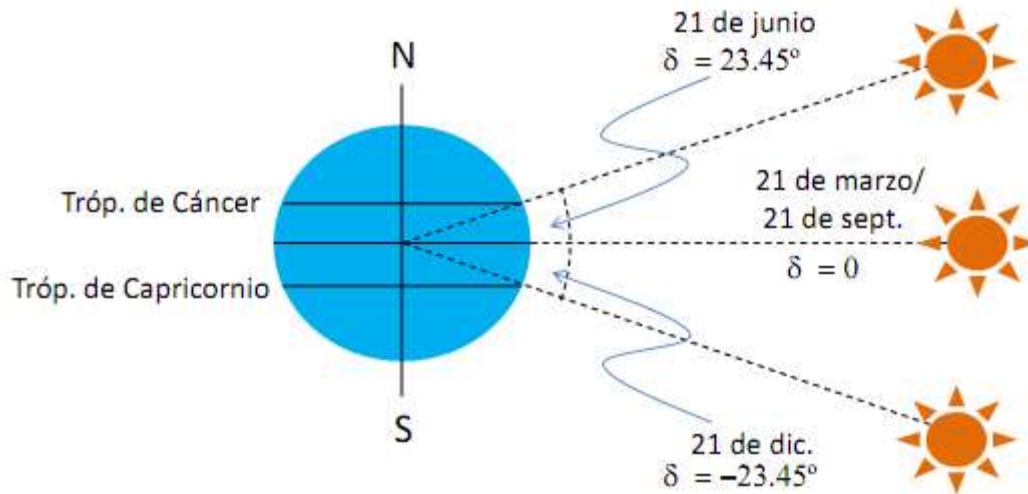


Figura 2.4 Declinación solar [1].

Este cambio aparente en la trayectoria del sol a lo largo del año se puede ver como una variación continua del ángulo de declinación solar, la cual se describe por la siguiente ecuación:

$$\delta = (23.45^\circ) \sin \left(\left(\frac{360}{365} \right) (284 + JD) \right) \quad (2.1)$$

En esta expresión JD es el número de día juliano, es un conteo de los días a partir del año -4712. Por tradición su inicio es a las 12 de mediodía de la hora universal, corresponde a una medida instantánea en la escala uniforme de la dinámica del tiempo. El hecho es que el año no tiene una duración de un número exacto de días, agregándose al calendario un día cada cuatro años para compensar, pero esto tampoco es totalmente exacto dado que el año dura en realidad 365.242190402 días, es decir, un poco menos de 365 días y un cuarto. Por esta razón, no se utiliza el calendario común de días y meses debido a las complicaciones para describir la posición de la tierra con respecto al sol en las ecuaciones astronómicas que describen las relaciones entre la tierra y el sol.

2.2. Posición solar.

La trayectoria del sol se describe a través de dos ángulos, el ángulo cenital (θ_z) y el ángulo azimutal (γ_s), los cuales se muestran en la figura 2.5. El ángulo cenital mide qué tan desviado se encuentra el sol con respecto a la vertical en un momento dado, mientras que el ángulo azimutal mide la desviación con respecto al norte. En ocasiones se utiliza otro ángulo llamado altura solar (α_s) el cual mide la desviación del sol respecto a la horizontal, es decir, su elevación. El ángulo de elevación es el complemento del ángulo cenital. Estos ángulos se ilustran en la figura 2.5.

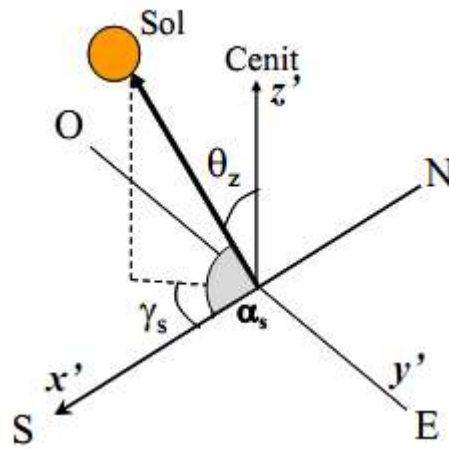


Figura 2.5 Ángulos cenital, acimutal y altura solar [12].

Donde γ_s es el ángulo azimutal, positivo después del mediodía solar hacia el oeste y negativo en la mañana hacia el este, θ_z es el ángulo cenital, α es la altura solar, que es el complemento del ángulo cenital, es decir:

$$\theta_z + \alpha = 90^\circ \quad (2.2)$$

Además, se maneja otro ángulo llamado ángulo horario (ω), el cual es el ángulo que describe el sol en el plano de su trayectoria aparente, siendo positivo después del mediodía solar hacia el oeste y negativo en la mañana hacia el este. El sol avanza en su trayectoria aparente 15° por hora, pues esta es la velocidad de rotación de la tierra (360° en 24 horas). El ángulo horario solar se ilustra en la figura 2.6.

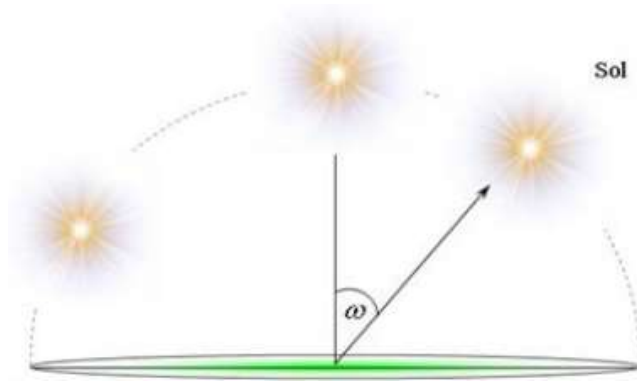


Figura 2.6 Ángulo horario solar [12].

2.3. Ángulo cenit.

En la figura 2.7 se muestra un sistema de referencia propuesto para realizar el cálculo del ángulo cenital. En este sistema de referencia la normal a la superficie de la tierra se expresa como el vector $\vec{n}$, quedando definido de la siguiente manera:

$$\vec{n} = (\cos\phi, 0, \sin\phi) \quad (2.3)$$

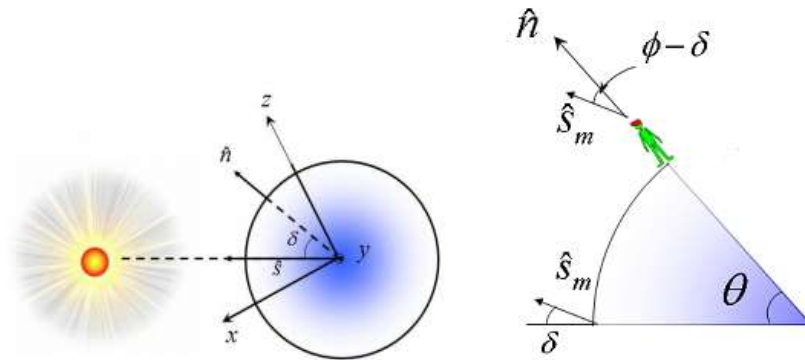


Figura 2.7 Sistema de referencia para el ángulo cenital, al mediodía solar [1].

Además, al mediodía solar, cuando el sol pasa justo sobre el meridiano, el vector unitario que apunta al sol puede definirse como:

$$\vec{s}_m = (\cos\delta, 0, \sin\delta) \quad (2.4)$$

De esta manera, el ángulo cenital al mediodía solar se puede expresar de la siguiente manera:

$$\cos\theta_{zm} = \vec{n} \cdot \vec{s}_m = \cos\phi\cos\delta + \sin\phi\sin\delta = \cos(\phi - \delta) \quad (2.5)$$

Invirtiendo esta ecuación queda:

$$\theta_{zm} = |\phi - \delta| \quad (2.6)$$

Para lo cual se toma en cuenta que $\theta_{zm} > 0$, por definición. Para interpretar la ecuación anterior es necesario considerar que cuando $\phi > \delta$ el sol se ve hacia el sur al mediodía y cuando $\phi < \delta$ el sol se ve hacia el norte.

Para hacer el cálculo del ángulo cenital a cualquier hora del día es necesario tomar en cuenta el giro aparente del sol en el cielo conforme transcurre el día. Esto es equivalente a considerar que el sol gira en el cielo con un ángulo igual al ángulo horario hacia la dirección del eje $-y$, es decir, un ángulo $-\omega$, o puesto de otra forma, que la tierra gira un ángulo ω hacia $+y$. Por lo tanto, debemos rotar el vector solar del mediodía un ángulo de $-\omega$. La matriz de rotación para hacer la transformación descrita es:

$$M_{(-\omega)} = \begin{bmatrix} \cos\omega & \sin\omega & 0 \\ -\sin\omega & \cos\omega & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Haciendo la operación se obtiene:

$$\vec{s} = M_{(-\omega)}\vec{s}_m = (\cos\omega\cos\delta, -\sin\omega\cos\delta, \sin\delta) \quad (2.8)$$

Este es el vector solar para una hora arbitraria del día y si tomamos su producto cruz con la normal a la superficie de la tierra obtendremos el ángulo cenital para cualquier momento.

$$\cos\theta_z = \vec{s} \cdot \vec{n} = \cos\phi\cos\delta\cos\omega + \sin\delta\sin\phi \quad (2.9)$$

2.4. Ángulo azimutal.

Una vez conocido el ángulo cenital, el siguiente paso para definir la posición del sol es conocer el ángulo azimutal, para el cálculo del mismo se utiliza el sistema de referencia mostrado en la figura 2.8.

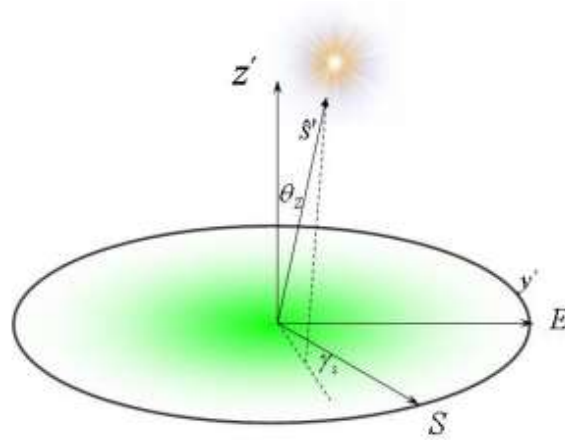


Figura 2.8 Sistema de referencia para el cálculo del ángulo azimutal.

Así, se puede definir el vector solar en este sistema de referencia de la siguiente manera:

$$\vec{s'} = (\cos\gamma_s \sin\theta_z, -\sin\gamma_s \sin\theta_z, \cos\theta_z) \quad (2.10)$$

Ahora, dadas las ecuaciones desarrolladas para el cálculo del ángulo cenital y aplicando transformaciones del sistema de referencia del ángulo cenital al ángulo azimutal se obtienen las siguientes expresiones:

$$\sin\gamma_s = \frac{\sin\omega \cos\delta}{\sin\theta_z} = S_s \quad (2.11)$$

$$\cos\gamma_s = \frac{\sin\phi \cos\omega \cos\delta - \cos\phi \sin\delta}{\sin\theta_z} = C_s \quad (2.12)$$

De estas expresiones se obtiene que:

$$\gamma'_s = \arctan\left(\frac{\text{sen}\omega\text{cos}\delta}{\text{sen}\phi\text{cos}\omega\text{cos}\delta - \text{cos}\phi\text{sen}\delta}\right) \quad (2.13)$$

El ángulo γ'_s no distingue entre cuadrantes, por lo tanto, se tienen criterios de senos y cosenos que están dados por las ecuaciones 2.11 y 2.12

$$\gamma_s = \begin{cases} \gamma'_s, & C_s \geq 0 \\ -180 + \gamma'_s, & C_s < 0 \text{ y } S_s < 0 \\ 180 + \gamma'_s, & C_s < 0 \text{ y } S_s > 0 \end{cases} \quad (2.14)$$

En la figura 2.9 se muestra la variación de ángulos cenit y azimut a las estaciones del año.

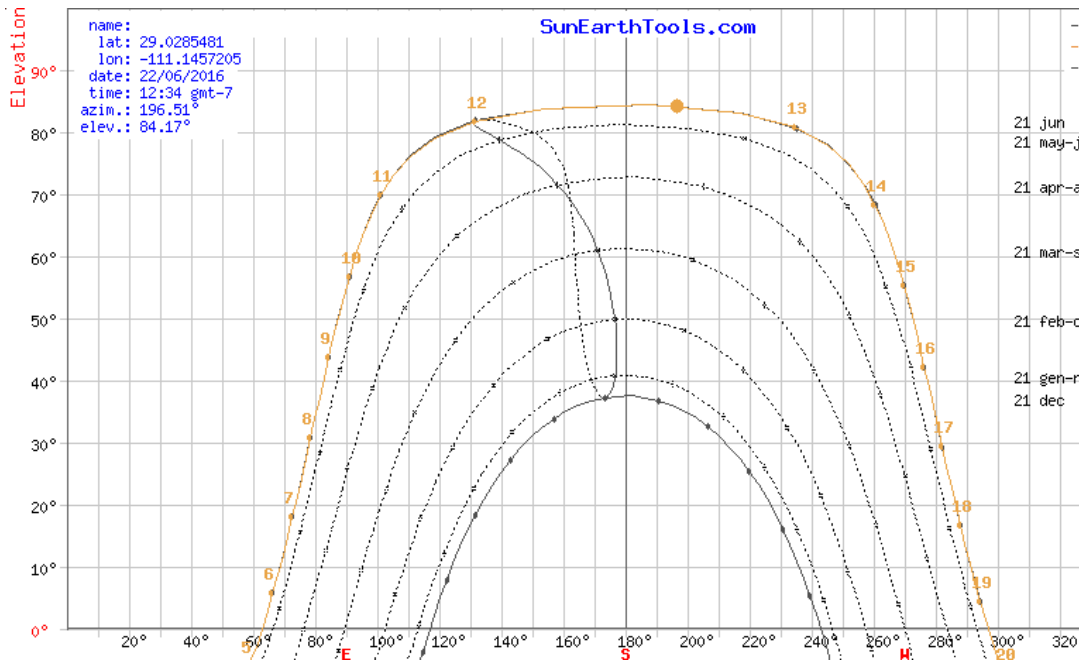


Figura 2.9 Variación de ángulos cenit y azimut con las estaciones del año.

Con el avance de la tecnología en aplicaciones solares, existe la demanda para calcular la posición solar, en la literatura se describen métodos para realizar estos cálculos, los cuales difieren en precisión y son válidos para un número específico de años, por ejemplo, en [3] se encuentran dos algoritmos para calcular la posición solar, uno de baja precisión de $\pm 0.01^\circ$, el cual solo toma en cuenta el movimiento elíptico de la tierra, esto es, sin considerar las perturbaciones de la luna y los planetas; otro desarrollado por Bretagnon y Simon en 1982,

el cual se fundamenta en (VSOP87) Variations séculaires des Orbites Planétaires Theory, con una precisión de 0.006 para los años entre 0 al 2800 y de .009 grados entre el año -4000 y 8000, fue modificado por Bretagnon and Francou en 1987 para dar una precisión de +- 0.003" entre los años -2000 al 6000 (1) el cual se describe a continuación.

2.5. Algoritmo de posición solar.

Cálculo del día juliano (JD), Ephemerides del día Juliano (JDE), siglo juliano (JC), efeméride del siglo juliano (JCE) y efemérides del milenio Juliano:

$$JD = INT(365.25 * (Y + 4716)) + INT(30.6001 * (M + 1)) + D + B - 1524.5 \quad (2.15)$$

$$JDE = JD + \frac{\Delta T}{86400} \quad (2.16)$$

$$JC = \frac{JD - 2451545}{36525} \quad (2.17)$$

$$JCE = \frac{JDE - 2451545}{36525} \quad (2.18)$$

$$JME = \frac{JCE}{10} \quad (2.19)$$

donde:

- INT Calculo del valor en términos enteros
- Y Es el año
- M Es el mes
- D es el día del mes
- B es igual a 0 para JD < 2299160 e igual a (2-A+INT(A/4)) para JD > 2299160, donde A = INT(Y/100).

Cálculo de la longitud (L), latitud (B) y vector radio (R) Heliocéntrico (posición de la tierra con respecto al centro del sol).

Para cada renglón de la tabla A1, se calcula LO_i (radianes)

$$LO_i = A_i * \cos(B_i + C_i * JME) \quad (2.20)$$

$$LO = \sum_i^n LO_i \quad (2.21)$$

donde:

- i es el i ésimo renglón para el término LO en la tabla A1.
- A_i , B_i y C_i son los valores para el i ésimo renglón de las columnas de A, B y C de la tabla A1 para el valor de LO_i (radianes).
- n es el número de renglón para el valor de LO en la tabla A1

Se calculan los términos L1, L2, L3, L4 y L5 utilizando las ecuaciones 2.20 y 2.21 cambiando el 0 por 1, 2, 3, 4 y 5 usando los valores correspondientes de la tabla A1.

La longitud heliocéntrica de la tierra en radianes, L se obtiene de:

$$L = \frac{LO + L1 * JME + L2 * JME^2 + L3 * JME^3 + L4 * JME^4 + L5 * JME^5}{10^8} \quad (2.22)$$

La longitud en grados está dada por

$$L = \frac{L(en \text{ radianes}) * 180}{\pi} \quad (2.23)$$

donde $\pi = 3.1415926535898$.

Calculo de la longitud y latitud geocéntrica (θ y β con respecto al centro de la tierra).

$$\theta = L + 180 \quad (2.24)$$

$$\beta = -B \quad (2.25)$$

donde B es la latitud heliocéntrica en grados que se obtiene de la tabla A1.

Cálculo de la inclinación en longitud y oblicuidad.

Elongación media de la luna desde el sol (X_0) en grados.

$$X_0 = 297.85036 + 445267.11148 * JCE - 0.0019142 * JCE^2 + \frac{JCE^3}{189474} \quad (2.26)$$

Anomalía media del sol con respecto a la tierra (X_1) en grados.

$$X_1 = 357.52772 + 35999.050340 * JCE - 0.0001603 * JCE^2 - \frac{JCE^3}{300000} \quad (2.27)$$

Anomalía media de la luna (X_2) en grados.

$$X_2 = 134.96298 + 477198.867398 * JCE - 0.0086972 * JCE^2 + \frac{JCE^3}{56250} \quad (2.28)$$

Cálculo de la latitud de la luna.

$$X_3 = 93.27191 + 483202.017538 * JCE - 0.0036825 * JCE^2 + \frac{JCE^3}{327270} \quad (2.29)$$

Calculo de la longitud de la órbita de la luna sobre la eclíptica, medida desde el equinoccio en grados.

$$X_4 = 125.04452 + 1934.136261 * JCE - 0.0020708 * JCE^2 + \frac{JCE^3}{450000} \quad (2.30)$$

Para cada renglón de la tabla A2 calcular los términos $\Delta\psi_i$ y $\Delta\varepsilon_i$ (en 0.0001 arco segundos)

$$= (a_i + b_i * JCE) * \sin\left(\sum_{j=0}^4 X_j * Y_{i,j}\right) \quad (2.31)$$

$$\Delta\varepsilon_i = (c_i + d_i) \cos(\sum_{j=0}^4 X_j * Y_{i,j}) \quad (2.32)$$

Cálculo de la inclinación en longitud.

$$\Delta\psi = \frac{\sum_{i=0}^n \Delta\psi_i}{36000000} \quad (2.33)$$

donde n es el número de renglón de la tabla A2

Cálculo de la inclinación en la oblicua.

$$\Delta\varepsilon = \frac{\sum_{i=0}^n \Delta\varepsilon_i}{36000000} \quad (2.34)$$

Cálculo de la inclinación en la oblicua de la eclíptica, ε .

$$\varepsilon = 84381.448 - 4680.93U - 1.55U^2 + 1999.25U^3 - 51.38U^4 - 249.67U^5 - 39.05U^6 + 7.12U^7 + 27.87U^8 + 5.79U^9 + 2.45U^{10} \quad (2.35)$$

donde $U = JME/10$

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_0}{3600} + \Delta\varepsilon \quad (2.36)$$

Cálculos de la corrección de aberración, $\Delta\tau$ (en grados).

$$\Delta\tau = \frac{20.4898}{3600 * R} \quad (2.37)$$

Cálculo de la longitud aparente del sol, λ en grados.

$$\lambda = \Theta + \Delta\psi + \Delta\tau \quad (2.38)$$

Cálculo del tiempo sidereal aparente en el meridiano de Greenwich, V en grados.

$$V_0 = 280.46061837 + 360.98564736629 * (JD - 2451545) + \quad (2.39)$$

$$0.000387933 * JC^2 - \frac{JC^3}{38710000}$$

$$V = V_0 + \Delta\psi * \cos(\varepsilon) \quad (2.40)$$

Cálculo del ascenso verdadero geocéntrico del sol, α en grados.

Ascenso verdadero geocéntrico del sol en radianes.

$$\alpha = Arc \tan 2\left(\frac{\sin \lambda * \cos \varepsilon - \tan \beta * \sin \varepsilon}{\cos \lambda}\right) \quad (2.41)$$

Ascenso verdadero geocéntrico del sol en grados.

$$\alpha = \frac{\alpha(en \ radianes) * 180}{\pi} \quad (2.42)$$

Cálculo de la declinación Geocéntrica del Sol en radianes

$$\delta = Arcsin(\sin \beta * \cos \varepsilon + \cos \beta * \sin \varepsilon * \sin \lambda) \quad (2.42)$$

Cálculo del ángulo de hora local del observador, H .

$$H = V + \sigma - \alpha \quad (2.43)$$

donde σ es la latitud geográfica del observador.

Cálculo del ascenso verdadero topo céntrico del sol, α' en grados.

Cálculo del parsec horizontal ecuatorial del sol, ξ en grados.

$$\xi = \frac{8.794}{3600 * R} (\quad (2.44)$$

Cálculo del término u .

$$u = \text{Arctan}(0.99664719 * \tan \varphi) \quad (2.45)$$

donde φ es la latitud geográfica del observador.

Calcular el término x ,

$$x = \cos u + \frac{E}{6378140} * \cos \varphi \quad (2.46)$$

donde E es la elevación del observador en metros.

Calcular el término y ,

$$y = 0.99664719 * \sin u + \frac{E}{6378140} * \sin \varphi \quad (2.47)$$

Cálculo del parsec del verdadero ascenso solar, $\Delta\alpha$,

$$\Delta\alpha = \text{Arc tan } 2\left(\frac{-x * \sin \xi * \sin H}{\cos \delta - x * \sin \xi * \cos H}\right) \quad (2.48)$$

Cálculo del verdadero ascenso topocéntrico solar, α' ,

$$\alpha' = \alpha + \Delta\alpha \quad (2.49)$$

Cálculo topo céntrico de la declinación solar, δ' ,

$$\delta' = \text{Arc tan } 2\left(\frac{(\sin \delta - y * \sin \xi) * \cos \Delta\alpha}{\cos \delta - x * \sin \xi * \cos H}\right) \quad (2.50)$$

Cálculo topocéntrico del ángulo de la hora local, H' ,

$$H' = H - \Delta\alpha \quad (2.51)$$

Cálculo del ángulo cenit topocéntrico.

Cálculo del ángulo de elevación topocéntrica sin corrección por refracción atmosférica, e_0 ,

$$e_0 = \text{Arc sin}(\sin \varphi * \sin \delta' + \cos \varphi * \cos \delta' \cos H') \quad (2.52)$$

Cálculo de la corrección por refracción atmosférica.

$$\Delta e = \frac{P}{1010} * \frac{283}{273 * T} * \frac{1.02}{60 * \tan(e_0 + \frac{10.3}{e_0 + 5.11})} \quad (2.53)$$

donde:

P es la presión promedio anual en milibares

T es la temperatura promedio anual en centígrados.

Cálculo del ángulo de elevación topocéntrico.

$$e = e_0 + \Delta e \quad (2.54)$$

Cálculo del ángulo cenit topocéntrico

$$\theta = 90 - e \quad (2.55)$$

Cálculo del ángulo de azimuth topocéntrico.

Cálculo del ángulo astronómico de azimuth topocéntrico.

$$\Gamma = \text{Arc tan } 2\left(\frac{\sin H'}{\cos H' * \sin \varphi - \tan \delta' * \cos \varphi}\right) \quad (2.56)$$

Medido en sentido horario a partir del sur.

Cálculo del ángulo de azimuth Topocéntrico para usuarios de radiación solar.

$$\Phi = 180 + \Gamma \quad (2.57)$$

2.6. Diseño mecánico.

En la literatura existen descripciones o procesos de diseño mecánico, por mencionar algunos ejemplos, Lieu y Sorbi en su libro de Diseño de ingeniería y el libro Diseño de Ingeniería Mecánica de Shigley, el cual se utiliza como referencia en esta sección de la tesis.

2.6.1. Proceso de diseño mecánico de acuerdo a Shigley.

El diseño mecánico es una tarea compleja que requiere muchas habilidades. Es necesario subdividir grandes relaciones en una serie de tareas simples. La complejidad del tema requiere una secuencia en la que las ideas se presentan y se revisan. Primero se aborda la naturaleza del diseño en general, luego el diseño en la ingeniería mecánica en particular. El diseño es un proceso iterativo con muchas fases interactivas. Existe un gran número de recursos para apoyar al diseñador, entre los que se incluyen numerosas fuentes de información y una gran abundancia de herramientas de diseño por computadora. Hay funciones que deben realizarse mediante códigos y normas, por la siempre presente economía, seguridad y consideraciones de responsabilidad legal del producto. La supervivencia de un componente mecánico está frecuentemente relacionada con el esfuerzo y la resistencia. Los aspectos de incertidumbre siempre han estado presentes en el diseño en la ingeniería y se abordan de manera típica mediante el factor de diseño y el factor de seguridad. El ingeniero de diseño no sólo necesita desarrollar competencia en su campo, sino que también debe cultivar un fuerte sentido de responsabilidad y ética de trabajo profesional.

2.6.1.1. Definición de diseño.

Diseñar es formular un plan para satisfacer una necesidad específica o resolver un problema. Si el plan resulta en la creación de algo físicamente real, entonces el producto debe ser funcional, seguro, confiable, competitivo, útil, que pueda fabricarse y comercializarse. El diseño es un proceso innovador y altamente iterativo. También es un proceso de toma de decisiones. Algunas veces éstas deben tomarse con muy poca información, en otras con apenas la cantidad adecuada. Algunas veces las decisiones se toman de manera tentativa, por

lo cual es conveniente reservarse el derecho de hacer ajustes a medida que se obtengan más datos. Lo importante es que el diseñador en ingeniería debe sentirse personalmente cómodo cuando ejerce la función de toma de decisiones y de resolución de problemas.

El diseño es una actividad de intensa comunicación en la cual se usan tanto palabras como imágenes y se emplean las formas escritas y orales. Los ingenieros deben comunicarse en forma eficaz y trabajar con gente de muchas disciplinas. Éstas son habilidades importantes y el éxito de un ingeniero depende de ellas. Las fuentes personales de creatividad de un diseñador, la habilidad para comunicarse y la destreza para resolver problemas están entrelazadas con el conocimiento de la tecnología y sus principios fundamentales. Las herramientas de la ingeniería (como las matemáticas, la estadística, la computación, las gráficas y el lenguaje) se combinan para producir un plan, que cuando se lleva a cabo crea un producto funcional, seguro, confiable, competitivo, útil, que se puede fabricar y comercializar, sin importar quién lo construya o lo use.

2.6.1.2. Fases del diseño.

El proceso completo, de principio a fin, que a menudo se bosqueja como se muestra en la figura 2.9, comienza con la identificación de una necesidad y la decisión de hacer algo al respecto. Después de muchas iteraciones, termina con la presentación de los planes para satisfacer la necesidad. De acuerdo con la naturaleza de la tarea de diseño, algunas fases de éste pueden repetirse durante la vida del producto, desde la concepción hasta la terminación. Por lo general, el proceso de diseño comienza con la identificación de una necesidad. Con frecuencia, el reconocimiento y la expresión de ésta constituyen un acto muy creativo, porque la necesidad quizá sólo sea una vaga inconformidad, un sentimiento de inquietud o la detección de que algo no está bien. A menudo la necesidad no es del todo evidente; el reconocimiento se acciona por una circunstancia adversa particular o por un conjunto de circunstancias aleatorias que se originan casi de manera simultánea.

Hay una diferencia notable entre el enunciado de la necesidad y la identificación del problema. La definición del problema es más específica y debe incluir todas las

especificaciones del objeto que va a diseñarse. Las especificaciones son las cantidades de entrada y salida, las características y dimensiones del espacio que el objeto debe ocupar y todas las limitaciones sobre estas cantidades. Puede considerarse al objeto que va a diseñarse como algo dentro de una caja negra. En este caso deben especificarse las entradas y salidas de la caja, junto con sus características y limitaciones. Las especificaciones definen el costo, la cantidad que se va a manufacturar, la vida esperada, el intervalo, la temperatura de operación y la confiabilidad. Los puntos obvios en las especificaciones son las velocidades, avances, limitaciones de la temperatura, el intervalo máximo, las variaciones esperadas en las variables, las limitaciones dimensionales y de peso, etcétera.

Hay muchas especificaciones implicadas que resultan del entorno particular del diseñador o de la naturaleza del problema en sí. Los procesos de manufactura disponibles, junto con las instalaciones de una cierta planta, constituyen restricciones a la libertad del diseñador y de aquí que sean parte de las especificaciones implicadas. Quizá una planta pequeña, por ejemplo, no posea maquinaria de trabajo en frío. Debido a que conoce esta circunstancia, el diseñador selecciona otros métodos de procesamiento de metal que se puedan realizar en la planta. Las habilidades de trabajo disponibles y la situación competitiva también constituyen restricciones implícitas. Cualquier cosa que limite la libertad de elección del diseñador significa una restricción. Por ejemplo, muchos materiales y tamaños se incluyen en los catálogos del proveedor, pero no todos pueden conseguirse con facilidad y suelen sufrir de escasez.

Algunas veces, a la síntesis de un esquema que conecta elementos posibles del sistema se le llama invención del concepto o diseño del concepto. Éste es el primer y más importante paso en la tarea de la síntesis. Varios esquemas deben proponerse, investigarse y cuantificarse en términos de medidas establecidas. A medida que el desarrollo del esquema progresa, se deben realizar análisis para evaluar si el desempeño del sistema es, cuando menos satisfactorio, y si lo es, qué tan bien se desempeñará. Los esquemas del sistema que no sobreviven al análisis se revisan, mejoran o desechan. Los que cuentan con potencial se optimizan para determinar el mejor desempeño del esquema. Los esquemas en competencia se comparan de manera que se pueda elegir el camino que conduzca al producto más competitivo. En la figura 2.9 se

muestra que la síntesis, el análisis y la optimización están relacionados en forma íntima e iterativa.

Puede observarse y debe destacarse, que el diseño es un proceso iterativo en el cual se procede a través de varios pasos, se evalúan los resultados y luego se regresa a una fase inicial del procedimiento. De esta manera, es posible sintetizar varios componentes de un sistema, analizar y optimizarlos y regresar a la síntesis para ver qué efectos tiene sobre las partes restantes del sistema.

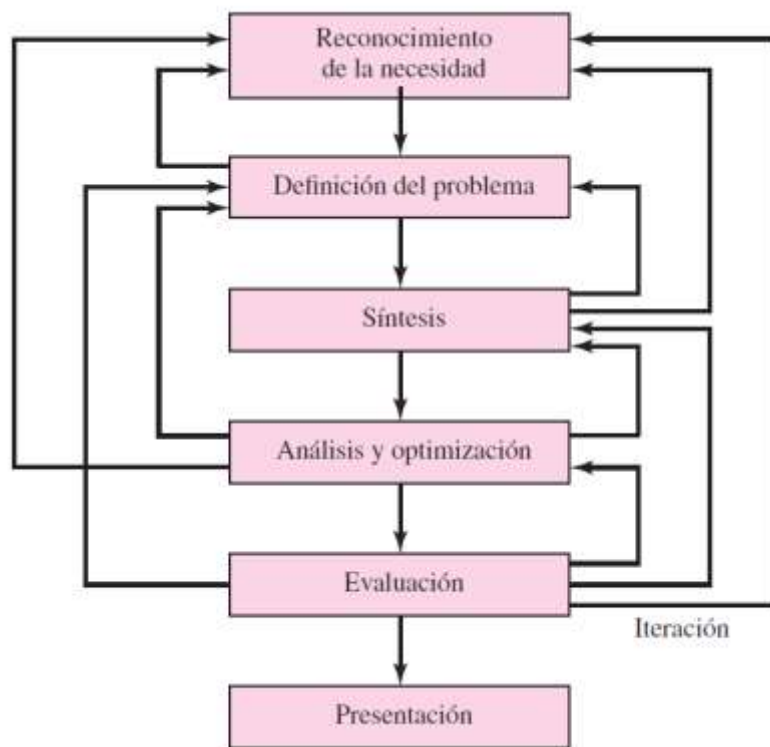


Figura 2.10 Fases del proceso de diseño que reconocen múltiples retroalimentaciones e iteraciones.

Tanto el análisis como la optimización requieren que se construyan o inventen modelos abstractos del sistema que admitirá alguna forma de análisis matemático. A estos modelos se llama modelos matemáticos. Cuando es creado, se espera que sea posible encontrar uno que simule muy bien al sistema físico real. Como se indica en la figura 2.9, la evaluación es una fase significativa del proceso de diseño total. La evaluación representa la prueba final de un

diseño exitoso y por lo general implica la prueba del prototipo en el laboratorio. Aquí se desea descubrir si el diseño en verdad satisface la necesidad. La comunicación de los resultados a otros, es el paso final y vital de presentación del proceso de diseño. La presentación es un trabajo de venta. El ingeniero, cuando presenta una nueva solución al personal administrativo, gerencial o de supervisión, está tratando de vender o probar que la solución propuesta es la mejor. A menos que lo anterior se pueda hacer de manera exitosa, el tiempo y el esfuerzo empleado en obtener la solución en gran parte se habrán desperdiciado. Cuando los diseñadores venden una idea nueva, también se venden a sí mismos. Si suelen tener éxito en la venta de ideas, diseños y soluciones nuevas a la gerencia, comienzan a recibir aumentos salariales y promociones; de hecho, así es como cualquiera tiene éxito en su profesión.

2.6.1.3. Consideraciones de diseño.

Algunas veces la resistencia que requiere un elemento de un sistema significa un factor importante para determinar su geometría y dimensiones. En esa situación se dice que la resistencia es una consideración de diseño importante. Cuando se emplea la expresión consideración de diseño, se involucra de manera directa una característica que influye en el diseño del elemento, o tal vez en todo el sistema. A menudo se deben considerar muchas de esas características en una situación de diseño específica. Las propiedades se relacionan de manera directa con las dimensiones, el material, el procesamiento y la unión de los elementos del sistema. Las características pueden estar interrelacionadas, lo que afecta la configuración del sistema total.

2.7. Herramientas y recursos de diseño.

En la actualidad, el ingeniero tiene una gran variedad de herramientas y recursos disponibles que le ayudan a solucionar problemas de diseño. Las microcomputadoras de bajo costo y los paquetes robustos de software proporcionan herramientas de gran capacidad para diseñar, analizar y simular componentes mecánicos. Además de estas herramientas, el ingeniero siempre necesita información técnica, ya sea en forma de desempeño básico en ciencias e ingeniería o las características de componentes especiales recién lanzados. En este caso, los

recursos pueden ir desde libros de ciencia e ingeniería hasta folletos o catálogos de los fabricantes. También la computadora puede jugar un papel importante en la recolección de información.

2.7.1. Herramientas computacionales.

El software para el diseño asistido por computadora (CAD) permite el desarrollo de diseños tridimensionales (3-D) a partir de los cuales pueden producirse vistas ortográficas convencionales en dos dimensiones con dimensionamiento automático. Las trayectorias de las herramientas pueden generarse a partir de los modelos 3-D y, en algunos casos, las partes pueden crearse directamente desde una base de datos 3-D mediante el uso de un método para la creación rápida de prototipos y manufactura. Otra ventaja de este tipo de base de datos, es que permite cálculos rápidos y exactos de ciertas propiedades como la masa, la localización del centro de gravedad y los momentos de inercia. Del mismo modo, pueden obtenerse con facilidad otras propiedades como áreas y distancias entre puntos. Existe una gran cantidad de software de CAD disponible como Aries, AutoCAD, CadKey, I-Deas, Unigraphics, Solid Works y ProEngineer, sólo por mencionar algunos.

El término ingeniería asistida por computadora (CAE) se aplica generalmente a todas las aplicaciones de ingeniería relacionadas con la computadora. Con esta definición, el CAD puede considerarse como un subconjunto del CAE. Algunos paquetes de computadora realizan análisis de ingeniería específicos y/o tareas de simulación que ayudan al diseñador, pero no se consideran una herramienta para la creación del diseño como lo es el CAD. Este software pertenece a dos categorías: basado en ingeniería y no específico para ingeniería. Algunos ejemplos de programas basados en ingeniería para aplicaciones de ingeniería mecánica —software que también podría integrarse dentro de un sistema CAD— son los programas para el análisis del elemento finito (AEF), para el análisis del esfuerzo y la deflexión, la vibración y la transferencia de calor; programas para la dinámica de fluidos computacional (CFD) para el análisis del flujo de fluidos y la simulación. Entre los ejemplos de aplicaciones asistidas por computadora no específicas para ingeniería pueden mencionarse los programas para el procesamiento de palabras, las hojas de cálculo, y solucionadores matemáticos. Sin embargo, es necesario tener cuidado: los programas de computadora no

sustituyen el proceso de pensamiento humano. En este caso, la computadora es solamente el vehículo que ayuda en el camino hacia una solución. Los números generados por una computadora pueden estar muy lejanos a la realidad si se ingresa una entrada incorrecta, si se malinterpreta la aplicación o la salida del programa, o si éste contiene algún error, etc. Es responsabilidad del diseñador asegurar la validez de los resultados, por lo que debe tener cuidado al revisar la aplicación y los resultados.

2.8. Volumen finito.

La simulación del flujo de fluidos es ampliamente utilizada en aplicaciones de ingeniería que van desde flujos alrededor de alas de los aviones y turbinas hidráulicas hasta flujos en los vasos sanguíneos y otros sistemas circulatorios. Una mejor comprensión del movimiento del fluido alrededor de los objetos, así como el comportamiento de los fluidos en los sistemas se logra llevando a cabo un análisis de fluidos. La dinámica de fluidos computacional (CFD) complementa los ensayos experimentales, ayuda a reducir el costo y tiempo de entrega de las iteraciones de diseño, y se ha convertido en una herramienta práctica indispensable siempre que se requiera diseño que involucre fluidos. En dinámica de fluidos, el movimiento de un fluido se describe matemáticamente usando cantidades físicas de la velocidad del fluido u , la presión p , la densidad ρ , y la viscosidad ν . El objetivo de simulación de fluidos es realizar un seguimiento de las variaciones de velocidad y presión del fluido en los diferentes puntos de su dominio.

Hay diferentes tipos de fluidos. Un fluido puede ser compresible ($\rho \neq \text{constante}$) o incompresible ($\rho = \text{constante}$), viscoso ($\nu \neq 0$) o no viscoso ($\nu = 0$), constante ($\partial u / \partial t = 0$) o inestable ($\partial u / \partial t \neq 0$) y laminar o turbulento (caótico). Por otra parte, un fluido puede ser newtoniano (si la viscosidad depende sólo de la temperatura y la presión, y el esfuerzo cortante es una función lineal de la velocidad de deformación del fluido) o no newtoniano (el esfuerzo cortante es una función no lineal de la velocidad de deformación del fluido). Todos los fluidos son compresibles en cierta medida, pero se puede considerar a los fluidos más comunes como incompresibles, cuyo movimiento se rige por la siguiente ecuación de Navier-Stokes (N-S):

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = \mathbf{u} \nabla \mathbf{u} + v \nabla^2 \mathbf{u} - \frac{\nabla p}{\rho} + \mathbf{f} \quad (2.58)$$

lo que demuestra que la aceleración $\partial \mathbf{u} / \partial t$ de una partícula de fluido se puede determinar por el efecto combinado de advección $\mathbf{u} \nabla \mathbf{u}$, difusión $v \nabla^2 \mathbf{u}$, gradiente de presión $\nabla p / \rho$, y la fuerza del cuerpo $\mathbf{f}$. Las ecuaciones N-S se pueden derivar directamente de las leyes de conservación de masa, momento y energía. Se debe tener en cuenta que para cada partícula de un campo fluido tenemos un conjunto de ecuaciones N-S. El cambio en la velocidad de una partícula depende de cómo las partículas que la rodean están presionando a su alrededor, de la resistencia a su movimiento, cambios en el gradiente de presión, y cómo las fuerzas externas como la gravedad actúan sobre él.

En coordenadas cartesianas en 3D, las ecuaciones N-S están dadas por:

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \omega \frac{\partial u}{\partial z} \right) &= v \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial x} + f_x \\ \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \omega \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= v \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial y} + f_y \\ \rho \left(\frac{\partial \omega}{\partial t} + u \frac{\partial \omega}{\partial x} + v \frac{\partial \omega}{\partial y} + \omega \frac{\partial \omega}{\partial z} \right) &= v \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial z} + f_z \end{aligned} \quad (2.59)$$

donde u , v y w son componentes de velocidad de la partícula de vector $\mathbf{u}$.

En el modelado CFD, las ecuaciones N-S para el movimiento de partículas se resuelven numéricamente tomando en cuenta las condiciones de contorno o frontera definidas, en una cuadrícula 3-D que representa el dominio del fluido a analizar.

2.9. Elemento finito.

El método de elementos finitos para el análisis estático de la estructura se desarrolla de manera general estableciendo propiedades del material, sujeciones del modelo y fuerzas actuantes en el modelo, como lo es el peso de la estructura y la fuerza debida a la acción del viento. El cálculo de deformaciones es el principal objetivo del análisis estático mediante

elementos finitos, en (2.60) se muestra la expresión para la obtención de deformaciones (Tirupathi R. & Ashok D., 2002), donde K es la matriz de rigidez global la cual contiene principalmente el módulo de elasticidad y geometría de los elementos unidos por sus los grados de libertad de cada elemento, F es la matriz que contiene las magnitudes de fuerzas localizadas en cada nodo de los elementos y Q es el vector que contienen los desplazamientos de todos los nodos de un elemento.

$$\mathbf{KQ} = \mathbf{F} \quad (2.60)$$

El cálculo de esfuerzo en los elementos del estudio estático se generan una vez obtenidas las deformaciones, mediante (2.61) (Tirupathi R. & Ashok D., 2002) se obtienen los esfuerzos, donde σ es la matriz que contiene los esfuerzos de cada elemento, D es la matriz dada por las propiedades del material (Modulo elástico y relación de Poisson), B es la matriz de deformación unitaria y q es el vector de desplazamiento de los nodos de un elemento.

$$\sigma = \mathbf{DBq} \quad (2.61)$$

Una vez obtenidos los resultados de esfuerzo y deformación es importante calcular el factor de seguridad en la estructura. En (2.62) se muestra la expresión para el cálculo del factor de seguridad, donde σ_{limite} es el esfuerzo límite permisible y σ es el esfuerzo obtenido en los elementos de la estructura. Se busca encontrar una relación mayor a 1.

$$FOS = \frac{\sigma_{limite}}{\sigma} \quad (2.62)$$

2.10. Seguidores Solares.

Muchos autores han estudiado los sistemas de seguimiento solar con diferentes aplicaciones para mejorar su eficiencia agregando dispositivos de seguimiento a estos sistemas [1-6]. Un mecanismo de seguimiento debe ser fiable y capaz de seguir el sol con un cierto grado de precisión, moviendo el seguidor a una posición determinada por el usuario. El uso de mecanismos de seguimiento solar aumenta la cantidad de energía recibida, lo cual genera una

mayor potencia de salida. Comercialmente, es relativamente fácil encontrar mecanismos de seguimiento de uno o dos grados de libertad, donde el mecanismo de un solo grado de libertad sigue el sol de este a oeste, y el de dos grados además puede cambiar el ángulo de altitud solar.

Un sistema de seguimiento solar consta de las siguientes partes (Bakos):

- i) El mecanismo de movimiento electromecánico.
- ii) Unidad de procesamiento de señales.
- iii) El software.

2.11. Automatización y control.

Para controlar el funcionamiento de los seguidores solares se han utilizado varias estrategias que van desde el uso de fotosensores para discriminar la posición del sol y enviar señales eléctricas proporcionales del error al controlador, que acciona los motores para realizar un seguimiento [5–8] hasta la utilización de controladores lógicos programables (PLC), como lo podemos ver en [9] para controlar concentradores parabólicos compuestos. Los Concentradores Fotovoltaicos (CPV) requieren de mayor precisión en el seguimiento, ya que se precisa reflejar la luz del sol en un área reducida, por lo tanto en este trabajo de investigación se decidió utilizar PLCs y diferente tipo de sensores, que es donde se pone énfasis en este apartado, debido a que se tiene pensado realizar el control de los motores de seguimiento por este medio y la obtención de datos de sensores y reloj de tiempo real.

2.11.1 Controladores Lógicos Programables.

Un controlador lógico programable (PLC) es un dispositivo de control industrial que proporciona un simple, pero robusto, método de control de fabricación y los procesos dinámicos. Como resultado de su bajo costo, adaptabilidad y fiabilidad, los PLC son el mecanismo de control más común utilizado por la fabricación de todo tipo de empresas para el control del medio ambiente, procesamiento de alimentos, el control de movimiento y

equipo automatizado. En México existe una amplia gama de proveedores de este equipo, y diferentes marcas comerciales como son Siemens, Allen Bradley, Abb, etc.

2.12. Sensores.

2.12.1. Encoders Absolutos

Los encoders absolutos (codificador rotatorio) son útiles dispositivos para medir la posición y una de sus grandes ventajas además de la precisión es que conservan sus datos de posición durante la pérdida de alimentación eléctrica.

2.12.2. Sensores de efecto Hall.

El sensor Hall utiliza el efecto Hall a través de las mediciones de campos magnéticos y corrientes eléctricas. Si fluye corriente por un sensor Hall y se aproxima a un campo magnético que fluye en dirección vertical al sensor, entonces el sensor crea un voltaje saliente proporcional al producto de la fuerza del campo magnético y de la corriente (ver Fig. 2.11).

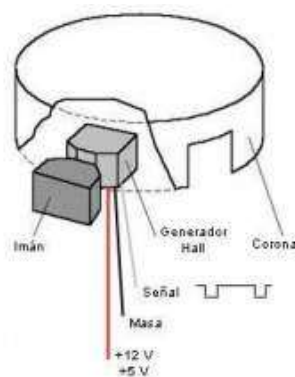


Figura 2.11 Sensor de efecto hall.

3. Desarrollo de la investigación.

En esta sección se describen las etapas del diseño y análisis del seguidor solar. Se utiliza software de diseño, tanto para el modelado de las partes y ensamble, como para el análisis estructural y cinemático.

3.1. Consideraciones de diseño del seguidor.

Siguiendo con la metodología mencionada en el capítulo anterior, se formó un equipo de diseño mecánico, que mediante reuniones periódica donde se compartieron opiniones, ideas y críticas, se estableció las necesidades, se definió la problemática y los objetivos específicos. Se determinó que deberán cumplirse las consideraciones de diseño enunciadas a continuación:

1. Restringir el peso de la estructura a no más de una tonelada.
2. Capacidad para producir hasta 9.6kw de energía utilizando 12 módulos de potencia.
3. Relativamente fácil de transportar instalar y dar mantenimiento.
4. Emplear materiales disponibles en el mercado.
5. Fácil y barato de fabricar.
6. Deformación máxima no mayor a 8 mm. en operación con velocidad de viento pico de 32 km. por hora.
7. Resistir fuerzas debido al viento de 140 km. por hora en estado de reposo sin sufrir deformaciones plásticas.
8. Protección contra la corrosión.

3.2. El diseño.

La investigación del estado del arte de seguidores solares derivó en encontrar artículos y reportes técnicos del tema, con diferentes formas y tamaños de seguidores y sus aplicaciones. A partir de esa lectura, se generaron ideas para utilizarlas en la definición de la modelación del sistema. Mediante el software Solidworks, se dibujaron las piezas, se efectuó el diseño con materiales y formas usuales en el mercado. El ensamble de los componentes del sistema

propuesto se realizó mediante un modelo virtual con fines de evaluación para las características relevantes como torque, peso, relaciones entre ángulos y movimiento de motor. Los modelos diseñados fueron del tipo azimutal y polares. Se plantearon versiones de dichos modelos, esto es, la versión hace referencia a los calibres y perfiles de los materiales empleados. De estas alternativas de seguidores solares, se seleccionó el modelo azimutal, según criterio de consideraciones de diseño. La figura 3.1 muestra el modelo.



Figura 3.1 Modelo virtual final del seguidor solar.

3.3. Datos del diseño.

- Peso total del seguidor: 1441.71424 Kilogramos.
- Peso de la estructura: 971 kg.
- Peso de espejos: 336 kg.
- Peso de motores: 134 kg.
- Área de captación de radiación solar: 32.67 m².

3.4. Equipo computacional.

El equipo utilizado para realizar los cálculos cuenta con las siguientes características:

Procesador Intel Core(TM) i7-4770
3.4GHz

Nvidia GeForce GTX 660

Disco duro SSD de 1 TB

Memoria RAM DDR4 de 32 GB

3.5. Análisis de arrastre de viento (Volumen Finito).

El análisis de volumen finito de la parte superior del seguidor, proporciona los resultados de presiones (cargas por arrastre de viento) sobre la superficie de la estructura, lo cual se llevó a cabo en Solidworks Flow Simulation. Se analizaron 4 escenarios (Tabla 3.1) de posición con ángulos α diferentes, a velocidades de viento de 32 kilómetros por hora en posiciones donde el seguidor está en operación y a una velocidad de viento de 140 km por hora para evaluar la supervivencia del seguidor en posición de reposo. En ángulo β se mantiene en cero por ser el ángulo más crítico, normal al viento.

Las velocidades de viento fueron proporcionadas por el CPH.

Tabla 3.1. Escenarios de estudio para análisis de volumen finito.

Escenario	Posición del seguidor α (°)	Velocidad del viento (m/s)
1	30	9
2	45	9
3	60	9
4	0	40

Se configuró el estudio utilizando como fluido el aire, se estableció una turbulencia del 10% como dato proporcionado por el CPH. A continuación se puede observar la figura 3.2, el mallado de las celdas para el estudio de volumen finito y en figura 3.3 se visualiza el dominio computacional. Figura 3.4 muestra la trayectoria del flujo del estudio

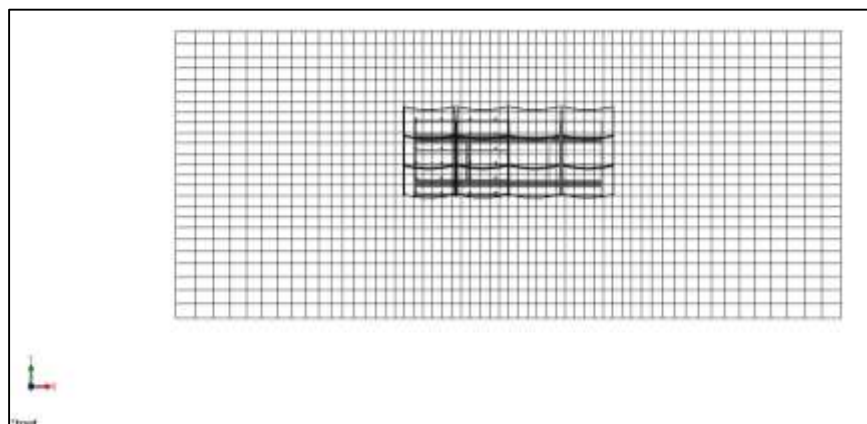


Figura 3.2 Mallado de celdas para volumen finito.

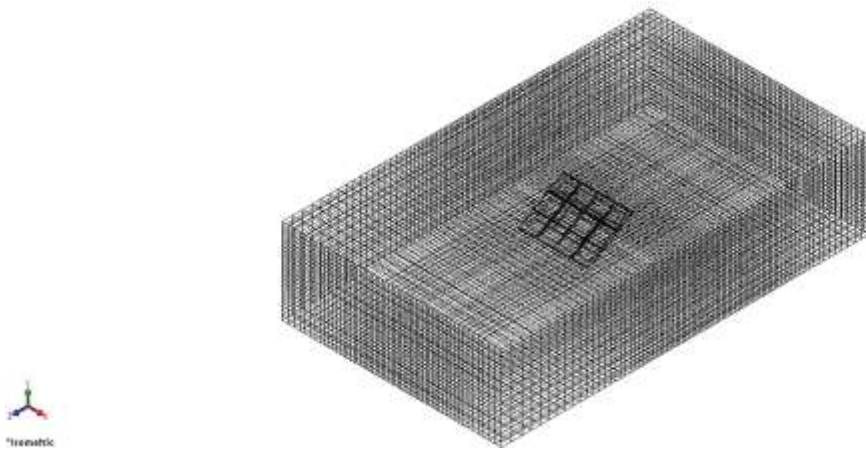


Figura 3.3 Mallado y dominio computacional del estudio de fluidos.

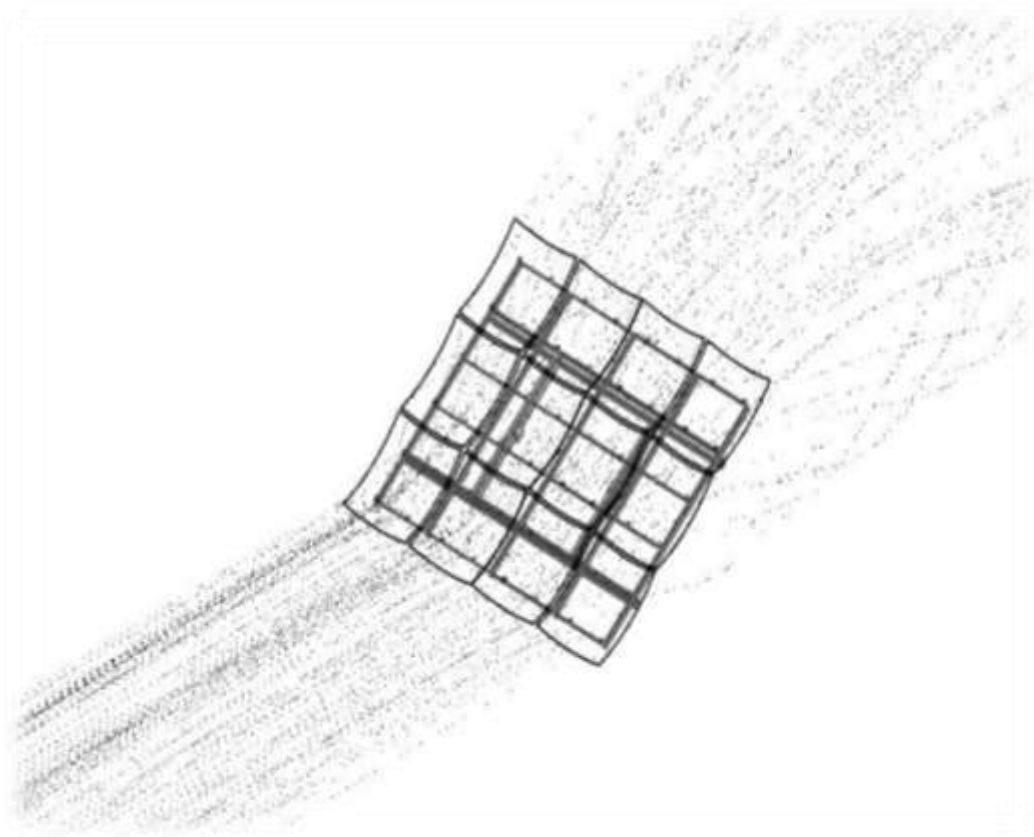


Figura 3.4 Trayectoria del fluido en el estudio de volumen finito para el escenario 1.

3.6. Análisis estructural de elementos finitos.

Se modeló la estructura del seguidor solar mediante elementos finitos en Solidworks, analizando los esfuerzos y deformaciones causados por las diferentes fuerzas externas (viento y la gravedad). Se examinó un conjunto de modificaciones en las características del seguidor hasta cumplir con restricciones de resistencia y deformación de diseño determinadas.

La malla utilizada es una combinación de elementos sólidos, superficies y viga y el tipo de malla es basado en curvatura, en la figura 3.5 y 3.6 Es posible visualizar el mallado desde la parte posterior y superior de la estructura.



Figura 3.5 Malla vista de la parte posterior a la estructura.

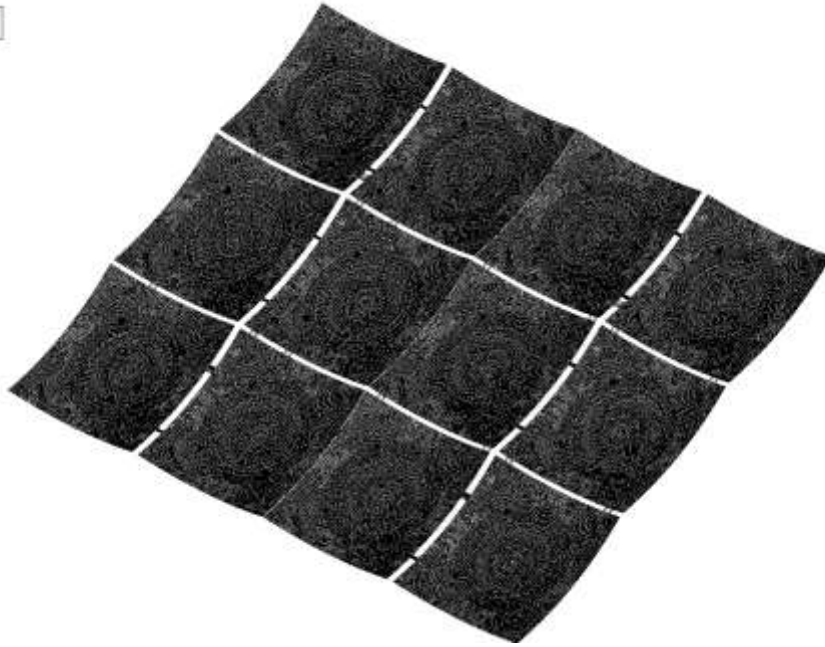


Figura 3.6 Malla vista desde la parte superior de la estructura.

3.7. Análisis de movimiento del modelo.

Con el modelo de seguimiento finalizado en Solidworks, se realizó análisis de movimiento para verificar que el modelo esté libre de interferencias y colisiones, teniendo como resultado una libertad de movimiento para el ángulo de zenit que va desde 0 hasta 78 grados y para el ángulo de azimut una libertad de movimiento de 360 grados.

Se incluye el análisis que especifica el cálculo del torque mínimo que requieren los motores. Se ajustó un polinomio de segundo orden que describe la relación entre el ángulo de cenit con respecto al avance del motor lineal.

3.8. Algoritmo de seguimiento.

Se cuenta con un algoritmo de seguimiento programado en Workbench de Allen Bradley, el cual se ejecutó con los datos de entrada que corresponden al lugar donde se instalaran los seguidores, dichos datos fueron proporcionados por el CPH y se muestran en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Información geográfica del laboratorio de energía de Hermosillo.

Latitud.	29.05
Longitud	-110.57
Zona Horaria	-7
Elevación	210 metros
Presión promedio anual	835 milibares
Temperatura promedio anual	24.2 °C

Los resultados del algoritmo para el día 23 de mayo del 2016, con un intervalo de tiempo de 30 segundos a partir de las 6:30 a las 12:22 horas se muestran en el apéndice A4.

3.9. Diseño y elementos de Automatización.

Una propuesta de automatización de seguimiento está compuesta por un algoritmo de seguimiento y el hardware necesario para automatizar el prototipo. Se busca además de posicionar los motores para el seguimiento, tener retroalimentación de los ángulos de posición mediante sensores absolutos de por lo menos 12 bits (4096 posiciones), con esta información medir el error de seguimiento y aplicar las compensaciones o correcciones necesarias.

Se considera llevar a cabo la automatización mediante un controlador lógico programable, integrando dispositivos para controlar y obtener informaciones de posición tanto de motores, sensores absolutos, anemómetros, reloj de tiempo real y relevadores. En la figura 3.7 se muestran los componentes requeridos para integrar el control de seguimiento los cuales se enlistan a continuación.

- PLC. Micro 850. Este dispositivo es el cerebro para controlar el seguimiento. Se buscó entre varios distribuidores de componentes de control y automatización, encontrándose que esta fue la solución más viable y la más económica de las consultadas con proveedores.

- PSU (Power System Unit), La unidad generadora de potencia, la cual genera datos de temperaturas, presiones, voltaje y potencia, que se pueden conectar al PLC mediante un cable serial dv9.
- Computadora. La computadora se utiliza para cargar el programa o rutinas al PLC, y se conecta mediante Ethernet con un switch o un cable USB.
- Reloj de tiempo Real (2080-MEMBAK-RTC). Dentro de los componentes necesarios es indispensable tener un reloj que ubique en el tiempo al PLC con la hora actual para ser utilizada en el algoritmo de seguimiento.
- Componente Analógico 2080-IF2. Este componente se utilizará para tomar lectura de la velocidad del viento dada por el anemómetro.
- Encoders Absolutos. Estos sensores proveerán información de la posición de los ángulos zenit y azimuth y así poder tener retroalimentación de la posición real en la cual se encuentre el seguidor.
- Motor Joyce Dayton. El sistema se mueve en ángulo zenit con este motor, el PLC será el responsable de accionarlo hasta posicionarlo donde se desea, genera una señal de 30.5 pulsos por pulgada de recorrido.
- Transmisión azimuthal. Es la responsable de mover el sistema en el ángulo azimuth a la posición deseada, produce una señal mediante un sensor de efecto hall. Se puede consultar la ficha técnica de ambos motores en el apéndice 2.
- Radiador y bomba. El radiador y la bomba, junto con una válvula deben de mantener a las unidades de potencia a una temperatura entre 40 y 85 °C , dependiendo de lo que se desee.

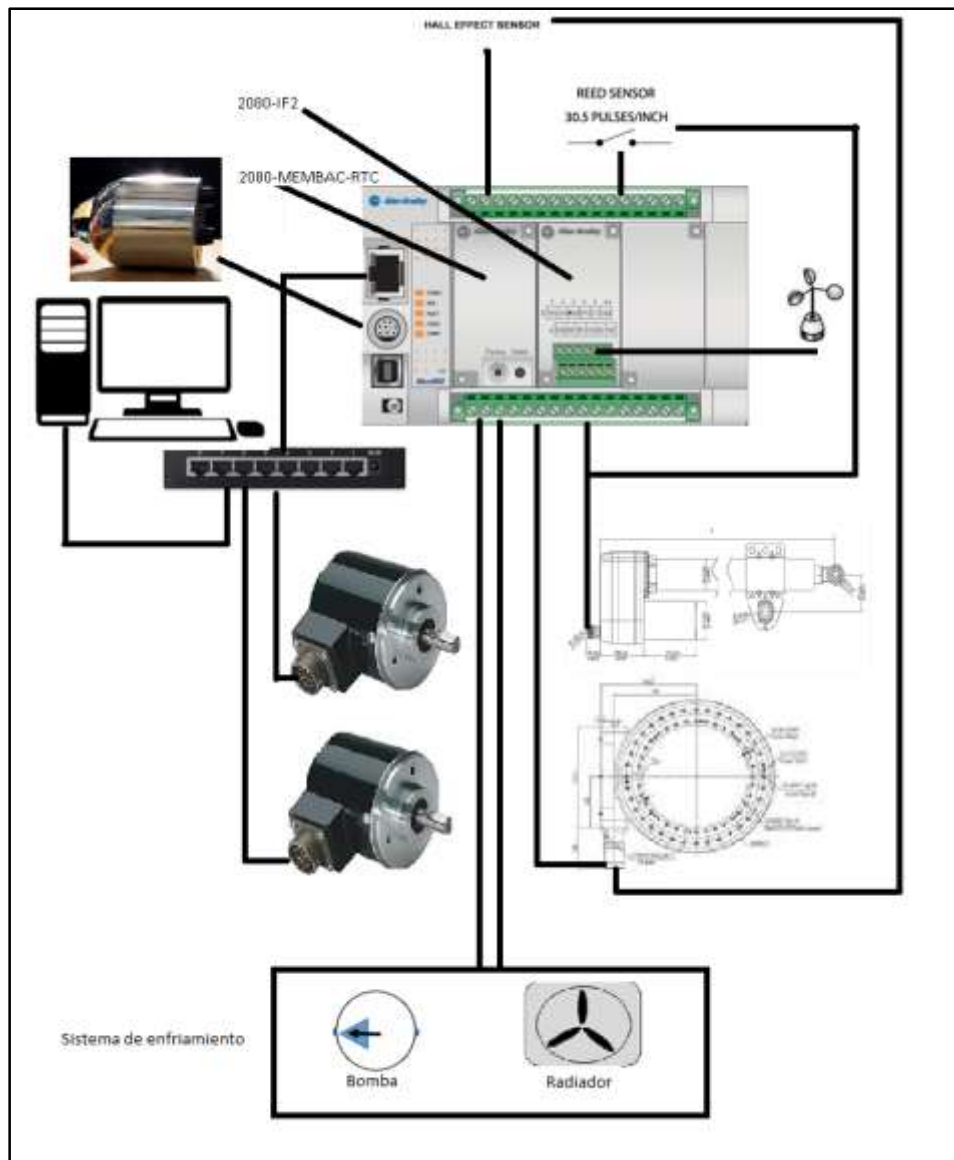


Figura 3.7 Esquema de integración de Automatización de seguimiento.

4. Análisis de resultados

4.1. Análisis de movimiento del seguidor

El torque necesario que requiere el motor lineal para elevar la estructura, la cual está configurada a la velocidad del motor de 6 mm por segundo se presenta en la figura 4.1. Se obtuvo que por lo menos se requiere un motor con una fuerza de 4,852 Newtons para elevar la estructura.

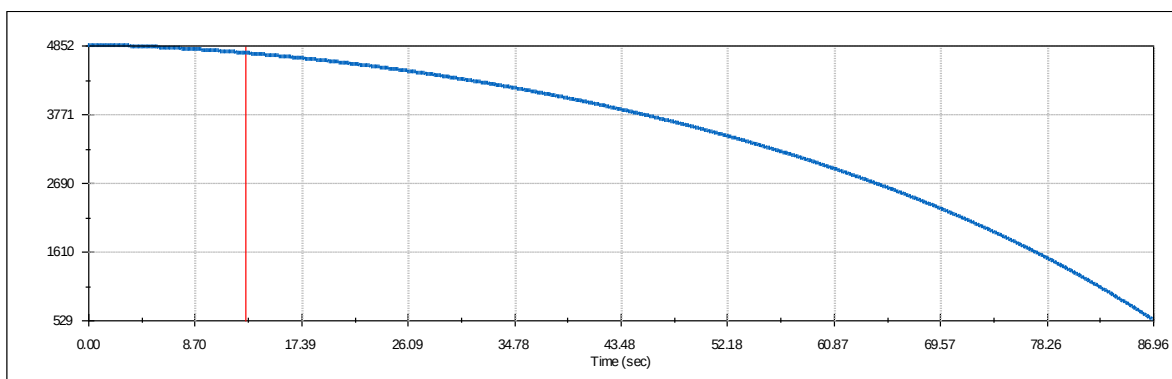


Figura 4.1 Relación de carga dinámica en el tiempo a una velocidad de 6 mm por segundo.

El motor seleccionado es un Joyce Dayton modelo SA9024C900 con una capacidad de carga dinámica de 9,000 Newtons y un recorrido de 900 mm, el cual cumple con los requisitos de diseño y cargas dinámicas.

De igual forma se observa en la figura 4.2, los resultados del estudio dinámico para la transmisión azimutal, obteniendo que se necesitan tan solo 42 Newtons-metros para poder mover la estructura, es una transmisión que está integrada por una corona de 102 dientes, un tornillo sin fin, un reductor planetario con una relación de 575 a 1 (modelo 24H/30/33), lo cual da por cada giro del motor un movimiento angular de 0.006 grados. Dicha transmisión cuenta con un sensor de efecto hall que nos genera una señal cada $\frac{1}{4}$ de revolución.

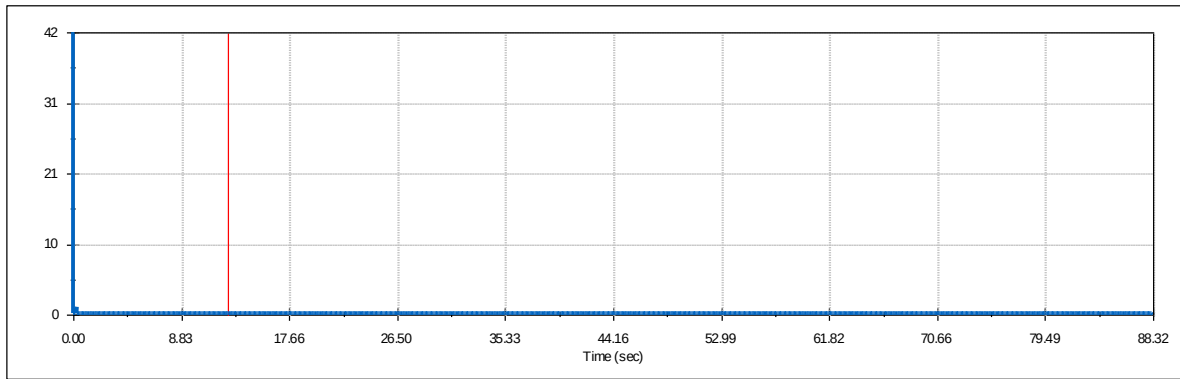


Figura 4.2 Relación de torque en el tiempo a una velocidad de 3/102 revoluciones por minuto.

Los resultados de la relación de ángulo y movimiento de los motores a una velocidad constante se muestran a continuación:

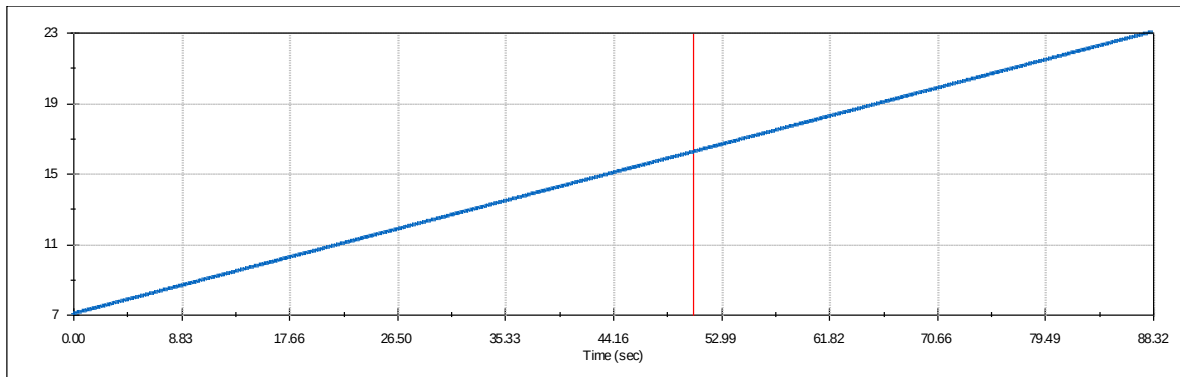


Figura 4.3 Relación ángulo azimut y tiempo a velocidad constante de 3/102 revoluciones por segundo.

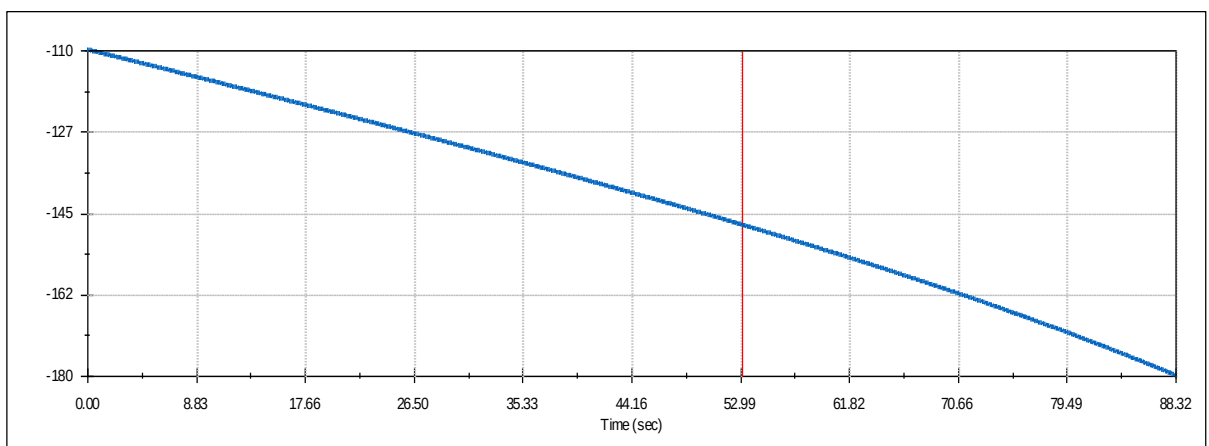


Figura 4.4 Relación ángulo zenit y tiempo a velocidad constante.

De la figura 4.4, el cambio del ángulo zenit con respecto al avance del motor lineal tiene un comportamiento con curvatura, por lo cual, se exportaron estos datos a Excel y se ajustó un

polinomio de segundo orden que se muestra en la figura 4.5, con una calidad de ajuste $R^2 = 1$. De esta ecuación es deducido el cambio que se necesita en el motor cenit para alcanzar la posición deseada.

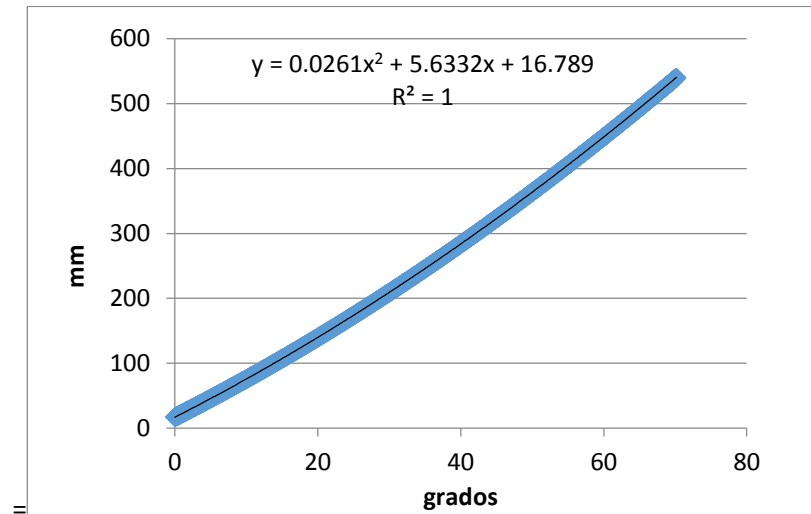


Figura 4.5 Ajuste de polinomio al ángulo cenit con respecto a un movimiento constante.

4.2. Obtención de presiones mediante volumen finito

En la figura 4.6 se puede observar la distribución de las presiones debidas al viento para el escenario 1. Una vez obtenidas las presiones generadas sobre la superficie de la estructura, estas se exportan al estudio de elementos finitos.

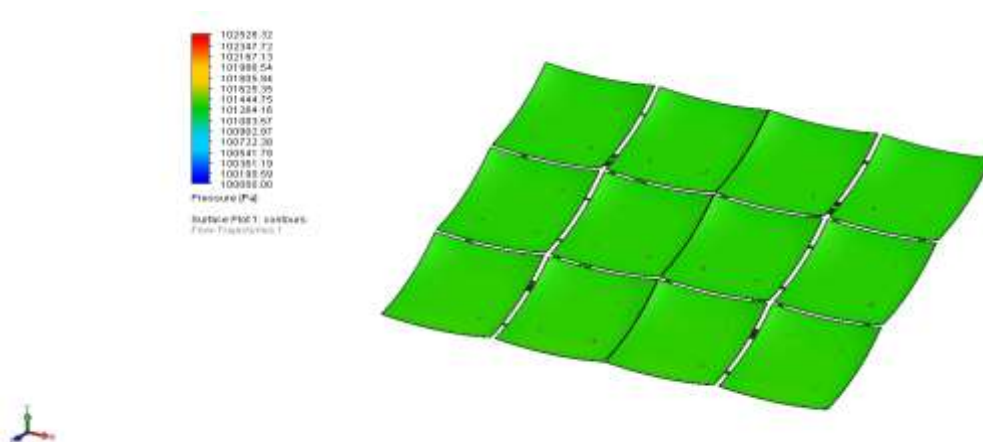


Figura 4.6 Presiones sobre estructura debidas al viento.

4.3. Resultados y análisis mediante elementos finitos

En la figura 4.7, se presenta la distribución de las deformaciones para el escenario 1:

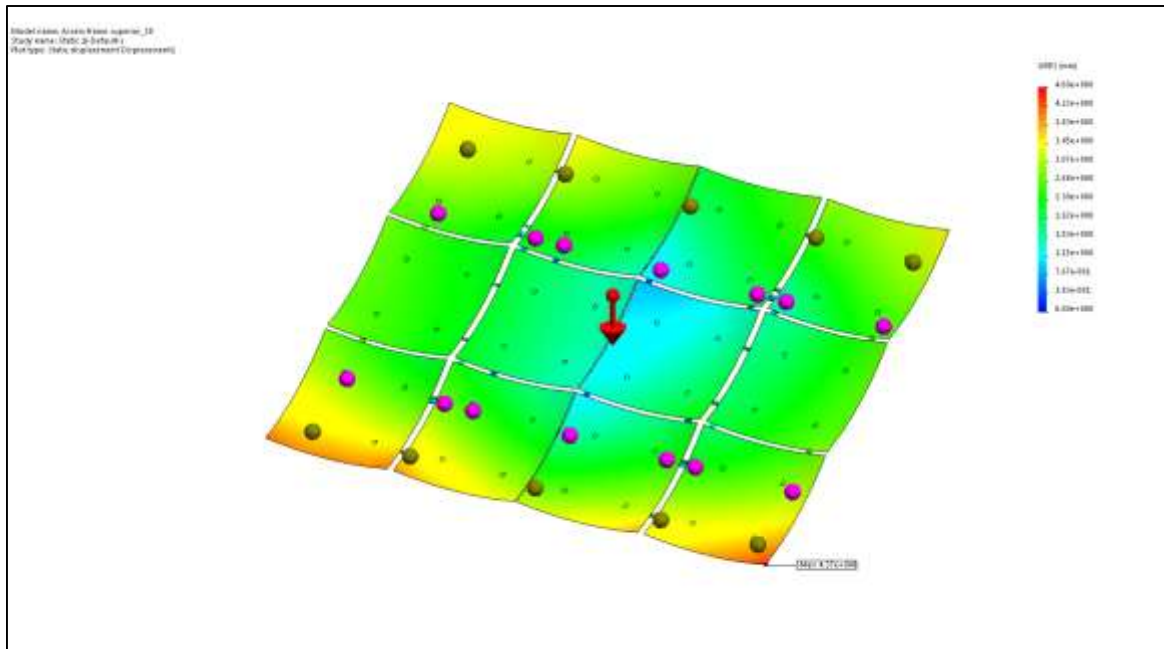


Figura 4.7 Distribución de deformaciones en estructura escenario 1.

Figura 4.8 muestra que el factor de seguridad de la estructura es mayor que 2.

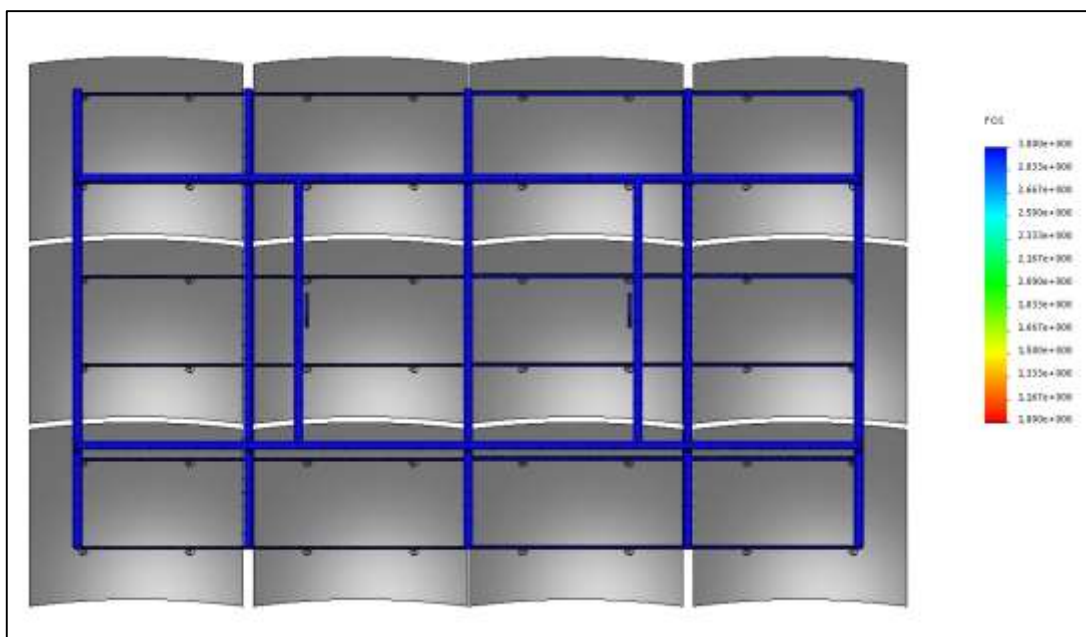


Figura 4.8 Estructura en escalas de colores que muestra el factor de seguridad.

A partir de las tablas 4.1 y 4.2 se distinguen las deformaciones en la estructura debidas a la gravedad y a la acción del viento, así como su factor de seguridad.

Tabla 4.1 Resultados de deformaciones para los 4 escenarios por los efectos de la gravedad y el viento.

Escenario	U _R (mm)	U _X (mm)	U _Y (mm)	U _Z (mm)	FOS
1	5.79	.35	5.42	2.434	>2
2	4.34	0.25	3.82	2.33	>2
3	3.66	0.22	2.77	2.40	>2
4	13.43	1.26	13.29	3.67	>1.5

Tabla 4.2 Resultados de deformaciones para los 4 escenarios por efecto de la gravedad.

Escenario	U _R (mm)	U _X (mm)	U _Y (mm)	U _Z (mm)	FOS
1	4.37	0.30	4.06	1.58	>2
2	3.81	0.23	3.37	2.02	>2
3	3.17	0.19	2.55	2.00	>2
4	4.40	0.32	4.34	0.73	>2

En la figura 4.9 se muestra el diseño de la base del seguidor. Se trasladaron las reacciones de los resultados de los estudios de la estructura superior obteniéndose, como se observa en la figura 4.10, que el peor de los resultados genera una deformación resultante de 2.35mm y un factor de seguridad mínimo de 2.6.



Figura 4.9 Ensamble del diseño de la base del seguidor.

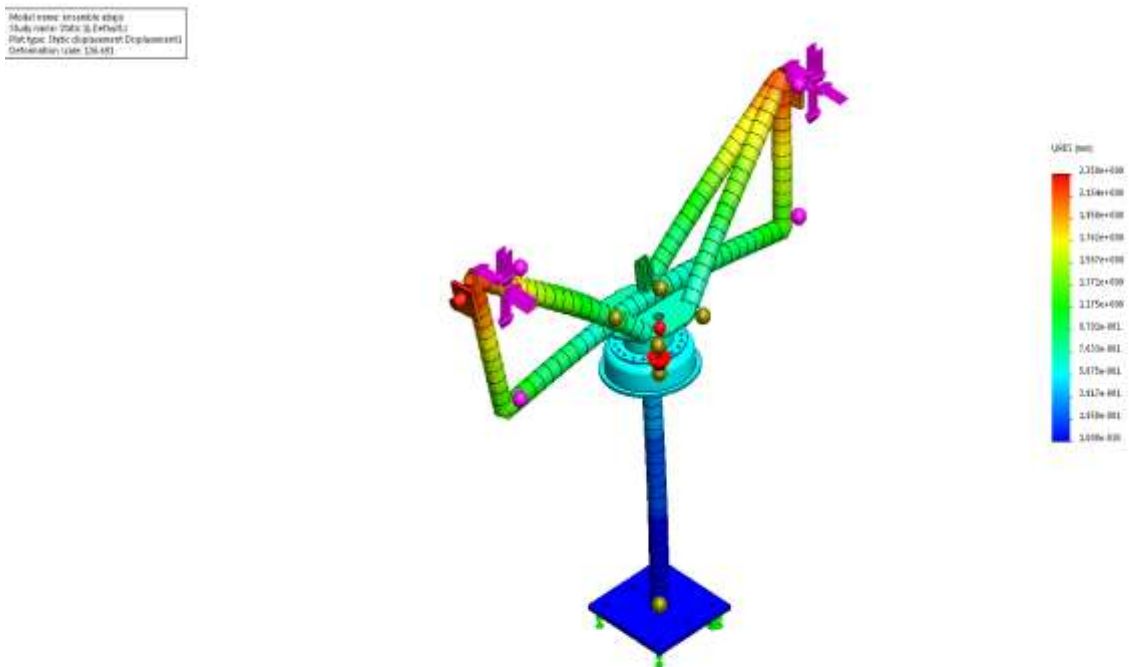


Figura 4.10 Resultados de deformaciones sobre la base del seguidor.

5. Conclusiones

En el presente trabajo se realizó el análisis de diseño de un seguidor solar para CPV, manipulando el modelo mediante volumen finito (CFD) se calculó las cargas debidas al viento en diferentes escenarios y diferentes velocidades. Una vez obtenida la carga del viento se procedió a un estudio estático mediante análisis de elementos finitos (FEA) para cada uno de los escenarios considerando las cargas debidas al viento y a la gravedad. En los resultados finales es posible observar y distinguir las deformaciones en la estructura debidas a la gravedad y a la acción del viento, así como su factor de seguridad. De lo anterior se concluye que la estructura propuesta en el modelo es aceptable, al no encontrarse un factor de seguridad a la deformación plástica crítico menor a 1.5 y las deformaciones en operación totales no fueron mayores de 8 mm.

6. Discusión

En Luque-Heredia *et al*, se menciona que para poder competir en el mercado de seguidores solares, el peso de la estructura debe de ser como ideal igual a 23.8 kilogramos por metro cuadrado, en este diseño es posible aproximarse a este objetivo realizando varios cambios, como podrían ser modificaciones en la base, en la transmisión azimutal y en el calibre de los espejos. Esto podría también compensarse con formas diferentes de como sujetar la estructura al suelo (zapatas), buscar una forma que sea más viable tanto en su sujeción como en su orientación, debido a que estas deben de estar orientadas al norte. Una propuesta para compensar lo anterior, es sujetando la estructura con varios puntales más pequeños en lugar de solo uno al centro e intentar solucionar la precisión con respecto al norte con sensores de posición, es decir posicionar el seguidor con respecto al sol como guía para configurar los sensores de posición.

Referencias

- [1] C. A. Arancibia y D. Riveros. Notas de curso: Aplicaciones térmicas de la energía solar; Centro de Investigación en Energía, UNAM, 2012.
- [2] I. Reda and A. Andreas. Solar position algorithm for solar radiation applications. Technical Report: WU1D5600. Golden, Colorado: National Renewable Energy Laboratory. 2008.
- [3] Meeus J. *Astronomical Algorithms*. 2nd. ed. Willmann-Bell, Inc. 1998.
- [4] D. K. Lieu y S. Sorby. *Dibujo para diseño de ingeniería*. Cengage Learning. 2011.
- [5] R. G. Budynas y J. K. Nisbett. *Diseño de Ingeniería Mecánica de Shigley*. 8va. ed. Mc Graw Hill. 2008
- [6] B. R. Munson, D. F. Young and T. H. Okiishi, *Fundamentals of Fluid Mechanics*, 5th ed. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, 2006.
- [7] T. R. Chandrupatla and A. D. Belegundu. *Introduction to finite elements in engineering*. 3th ed. Prentice Hall. 2002
- [8] S. A. Kalogirou. "Design and construction of a one-axis Sun-tracking system," *Solar Energy* vol. 57, no. 6, pp 465-469. 1996.
- [9] S. Abdallah. "The effect of using Sun tracking systems on the voltage–current characteristics and power generation of a flat plate photovoltaics", *Energy Convers Manage* 2004; 45:1671–9.
- [10] A. Khalifa and S. Al-Mutawalli. "Effect of two axis Sun tracking on the performance of compound parabolic concentrators", *Energy Convers Manage*, 1998; 39(10):1073–9.
- [11] A. Al-Mohamad. "Efficiency improvements of photo-voltaic panels using a Sun-tracking system", *Appl Energy*, 2004; 79:345–54.
- [12] A. Abdallah and S. Nijmeh. "Two axes Sun tracking system with PLC control", *Energy Convers Manage*, 2004; 45:1931–9.
- [13] S. Kalogirou. "Design of a fuzzy single-axis Sun tracking controller", *Int J Renew Energy Eng*, 2002; 4(2).

- [14] G. C. Bakos. "Desing and construction of a two-axis Sun tracking system for parabolic trough collector (PTC) efficiency improvement," *Renewable Energy* 31 (2006) 2411-2421.
- [15] P. Baltas, M. Tortoreli and P. Russel. "Evaluation of power output for fixed and step tracking photovoltaic arrays." *Solar Energy* 1986; 37(2):147-63.
- [16] Brunotte M, Goetzberger A, Blieske U. Two-stage concentrator permitting concentration factors up to 300X with one-axis tracking. *Solar Energy* 1996; 56(3):285-300.
- [17] S. Shinni and N. Rumala. "A shadow method for automatic tracking," *Solar Energy* 1986; 37(3):245-7.
- [18] R. Zogbit and D. Laplaze. "Design and construction of a sun tracker," *Solar Energy* 1984; 33(314):369-72.
- [19] S. Abdallah and S. Nijmeh. "Two axes sun tracking system with PLC control," *Energy Conversion & Managment*. 45 (2204) 1931-39.
- [20] Luque-Heredia, I., Quémère, G., Cervantes, R., Laurent, O., Chiappori, E., y Ying-Chong, Jing. (2012). 'The Sun Tracker in Concentrator Photovoltaics', en Cristóbal López, A.B., Martí Vega, A., y Luque López, A. (eds), *Next Generation of Photovoltaics*, Springer Series in Optical Sciences, 165, pp. 61-93.

Apéndice 1

Tabla A1. Términos periódicos de la Tierra.

Término	Número de fila	A	B	C
<i>L0</i>	0	175347046	0	0
	1	3341656	4.6692568	6283.07585
	2	34894	4.6261	12566.1517
	3	3497	2.7441	5753.3849
	4	3418	2.8289	3.5231
	5	3136	3.6277	77713.7715
	6	2676	4.4181	7860.4194
	7	2343	6.1352	3930.2097
	8	1324	0.7425	11506.7698
	9	1273	2.0371	529.691
	10	1199	1.1096	1577.3435
	11	990	5.233	5884.927
	12	902	2.045	26.298
	13	857	3.508	398.149
	14	780	1.179	5223.694
	15	753	2.533	5507.553
	16	505	4.583	18849.228
	17	492	4.205	775.523
	18	357	2.92	0.067
	19	317	5.849	11790.629
	20	284	1.899	796.298
	21	271	0.315	10977.079
	22	243	0.345	5486.778
	23	206	4.806	2544.314
	24	205	1.869	5573.143
	25	202	2.458	6069.777
	26	156	0.833	213.299
	27	132	3.411	2942.463
	28	126	1.083	20.775
	29	115	0.645	0.98
	30	103	0.636	4694.003
	31	102	0.976	15720.839
	32	102	4.267	7.114
	33	99	6.21	2146.17
	34	98	0.68	155.42

	35	86	5.98	161000.69
	36	85	1.3	6275.96
	37	85	3.67	71430.7
	38	80	1.81	17260.15
	39	79	3.04	12036.46
	40	75	1.76	5088.63
	41	74	3.5	3154.69
	42	74	4.68	801.82
	43	70	0.83	9437.76
	44	62	3.98	8827.39
	45	61	1.82	7084.9
	46	57	2.78	6286.6
	47	56	4.39	14143.5
	48	56	3.47	6279.55
	49	52	0.19	12139.55
	50	52	1.33	1748.02
	51	51	0.28	5856.48
	52	49	0.49	1194.45
	53	41	5.37	8429.24
	54	41	2.4	19651.05
	55	39	6.17	10447.39
	56	37	6.04	10213.29
	57	37	2.57	1059.38
	58	36	1.71	2352.87
	59	36	1.78	6812.77
	60	33	0.59	17789.85
	61	30	0.44	83996.85
	62	30	2.74	1349.87
	63	25	3.16	4690.48
LI	0	628331966747	0	0
	1	206059	2.678235	6283.07585
	2	4303	2.6351	12566.1517
	3	425	1.59	3.523
	4	119	5.796	26.298
	5	109	2.966	1577.344

	6	93	2.59	18849.23
	7	72	1.14	529.69
	8	68	1.87	398.15
	9	67	4.41	5507.55
	10	59	2.89	5223.69
	11	56	2.17	155.42
	12	45	0.4	796.3
	13	36	0.47	775.52
	14	29	2.65	7.11
	15	21	5.34	0.98
	16	19	1.85	5486.78
	17	19	4.97	213.3
	18	17	2.99	6275.96
	19	16	0.03	2544.31
	20	16	1.43	2146.17
	21	15	1.21	10977.08
	22	12	2.83	1748.02
	23	12	3.26	5088.63
	24	12	5.27	1194.45
	25	12	2.08	4694
	26	11	0.77	553.57
	27	10	1.3	6286.6
	28	10	4.24	1349.87
	29	9	2.7	242.73
	30	9	5.64	951.72
	31	8	5.3	2352.87
	32	6	2.65	9437.76
	33	6	4.67	4690.48
L2	0	52919	0	0
	1	8720	1.0721	6283.0758
	2	309	0.867	12566.152
	3	27	0.05	3.52
	4	16	5.19	26.3
	5	16	3.68	155.42
	6	10	0.76	18849.23
	7	9	2.06	77713.77
	8	7	0.83	775.52

	9	5	4.66	1577.34
	10	4	1.03	7.11
	11	4	3.44	5573.14
	12	3	5.14	796.3
	13	3	6.05	5507.55
	14	3	1.19	242.73
	15	3	6.12	529.69
	16	3	0.31	398.15
	17	3	2.28	553.57
	18	2	4.38	5223.69
	19	2	3.75	0.98
L3	0	289	5.844	6283.076
	1	35	0	0
	2	17	5.49	12566.15
	3	3	5.2	155.42
	4	1	4.72	3.52
	5	1	5.3	18849.23
	6	1	5.97	242.73
L4	0	114	3.142	0
	1	8	4.13	6283.08
	2	1	3.84	12566.15
L5	0	1	3.14	0
B0	0	280	3.199	84334.662
	1	102	5.422	5507.553
	2	80	3.88	5223.69
	3	44	3.7	2352.87
	4	32	4	1577.34
B1	0	9	3.9	5507.55
	1	6	1.73	5223.69
R0	0	100013989	0	0
	1	1670700	3.0984635	6283.07585
	2	13956	3.05525	12566.1517
	3	3084	5.1985	77713.7715
	4	1628	1.1739	5753.3849
	5	1576	2.8469	7860.4194
	6	925	5.453	11506.77
	7	542	4.564	3930.21
	8	472	3.661	5884.927

	9	346	0.964	5507.553
	10	329	5.9	5223.694
	11	307	0.299	5573.143
	12	243	4.273	11790.629
	13	212	5.847	1577.344
	14	186	5.022	10977.079
	15	175	3.012	18849.228
	16	110	5.055	5486.778
	17	98	0.89	6069.78
	18	86	5.69	15720.84
	19	86	1.27	161000.69
	20	65	0.27	17260.15
	21	63	0.92	529.69
	22	57	2.01	83996.85
	23	56	5.24	71430.7
	24	49	3.25	2544.31
	25	47	2.58	775.52
	26	45	5.54	9437.76
	27	43	6.01	6275.96
	28	39	5.36	4694
	29	38	2.39	8827.39
	30	37	0.83	19651.05
	31	37	4.9	12139.55
	32	36	1.67	12036.46
	33	35	1.84	2942.46
	34	33	0.24	7084.9
	35	32	0.18	5088.63
	36	32	1.78	398.15
	37	28	1.21	6286.6
	38	28	1.9	6279.55
	39	26	4.59	10447.39
RI	0	103019	1.10749	6283.07585
	1	1721	1.0644	12566.1517
	2	702	3.142	0
	3	32	1.02	18849.23
	4	31	2.84	5507.55

	5	25	1.32	5223.69
	6	18	1.42	1577.34
	7	10	5.91	10977.08
	8	9	1.42	6275.96
	9	9	0.27	5486.78
<i>R2</i>	0	4359	5.7846	6283.0758
	1	124	5.579	12566.152
	2	12	3.14	0
	3	9	3.63	77713.77
	4	6	1.87	5573.14
	5	3	5.47	18849.23
<i>R3</i>	0	145	4.273	6283.076
	1	7	3.92	12566.15
<i>R4</i>	0	4	2.56	6283.08

Apéndice 2

Tabla A2. Términos periódicos para la Inclinación en Longitud y Oblicuidad.

Coefficients for Sin terms					Coefficients for $\Delta\psi$		Coefficients for $\Delta\epsilon$	
Y0	Y1	Y2	Y3	Y4	a	b	c	d
0	0	0	0	1	-171996	-174.2	92025	8.9
-2	0	0	2	2	-13187	-1.6	5736	-3.1
0	0	0	2	2	-2274	-0.2	977	-0.5
0	0	0	0	2	2062	0.2	-895	0.5
0	1	0	0	0	1426	-3.4	54	-0.1
0	0	1	0	0	712	0.1	-7	
-2	1	0	2	2	-517	1.2	224	-0.6
0	0	0	2	1	-386	-0.4	200	
0	0	1	2	2	-301		129	-0.1
-2	-1	0	2	2	217	-0.5	-95	0.3
-2	0	1	0	0	-158			
-2	0	0	2	1	129	0.1	-70	
0	0	-1	2	2	123		-53	
2	0	0	0	0	63			
0	0	1	0	1	63	0.1	-33	
2	0	-1	2	2	-59		26	
0	0	-1	0	1	-58	-0.1	32	
0	0	1	2	1	-51		27	
-2	0	2	0	0	48			
0	0	-2	2	1	46		-24	
2	0	0	2	2	-38		16	
0	0	2	2	2	-31		13	
0	0	2	0	0	29			
-2	0	1	2	2	29		-12	
0	0	0	2	0	26			
-2	0	0	2	0	-22			
0	0	-1	2	1	21		-10	
0	2	0	0	0	17	-0.1		
2	0	-1	0	1	16		-8	
-2	2	0	2	2	-16	0.1	7	
0	1	0	0	1	-15		9	
-2	0	1	0	1	-13		7	
0	-1	0	0	1	-12		6	
0	0	2	-2	0	11			

2	0	-1	2	1	-10		5	
2	0	1	2	2	-8		3	
0	1	0	2	2	7		-3	
-2	1	1	0	0	-7			
0	-1	0	2	2	-7		3	
2	0	0	2	1	-7		3	
2	0	1	0	0	6			
-2	0	2	2	2	6		-3	
-2	0	1	2	1	6		-3	
2	0	-2	0	1	-6		3	
2	0	0	0	1	-6		3	
0	-1	1	0	0	5			
-2	-1	0	2	1	-5		3	
-2	0	0	0	1	-5		3	
0	0	2	2	1	-5		3	
-2	0	2	0	1	4			
-2	1	0	2	1	4			
0	0	1	-2	0	4			
-1	0	1	0	0	-4			
-2	1	0	0	0	-4			
1	0	0	0	0	-4			
0	0	1	2	0	3			
0	0	-2	2	2	-3			
-1	-1	1	0	0	-3			
0	1	1	0	0	-3			
0	-1	1	2	2	-3			
2	-1	-1	2	2	-3			
0	0	3	2	2	-3			
2	-1	0	2	2	-3			

Apéndice 3. Productividad Académica

Ponente en congreso internacional de la XXXIX Semana Nacional de Energía Solar, Campeche. México.



MODELACIÓN DE LA DEFORMACIÓN DE UN HELIOSTATO SOMETIDO A CARGAS DE VIENTO MEDIANTE ANÁLISIS DE ELEMENTO Y VOLUMEN FINITO.

C. Nicolás Moreroqui, U. Herrera Jimenez y R. García Gutiérrez, V. Reuter Raltztor
Universidad de Sonora, Blvd. Los Rioses y Rueda 316, Col. Centro, Hermosillo Sonora, 8300 México

U. Edgarito Trujillo
Unidad Agronomías, Centro de Investigaciones en Agronomía, P.O. Box 128, Carretera Loma Blanca, Ags., Ags., 10006
México edgarito@ciat.mx

C. Aracelio Salas
Departamento de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México, P.O. Box 700, Ciudad de México, 04510, México

RESUMEN

La modelación para predecir el funcionamiento y eficiencia de los componentes de una planta termosolar de torre central tales como el heliostato o el receptor es fundamental. Las deformaciones de un heliostato causadas por las cargas de viento y gravedad afectan su rendimiento óptico y disminuyen el ángulo solar reflejado en el receptor, lo cual repercute en la eficiencia global de la planta. El comprender el efecto de estas cargas sobre la estructura de soporte del heliostato es indispensable para proponer mejores diseños, buscando optimizar el peso de la estructura sin comprometer su estabilidad y funcionamiento. En este trabajo se reporta un estudio de cargas de viento sobre un heliostato de 25 m² y 12 ejes/plazas (estructura tipo 4 ejes/plazas) (diferentes velocidades de viento) utilizando simulación CFD de volumen finito. Con este estudio se determinó la distribución de presiones sobre la superficie de los ejes/plazas del heliostato. Posteriormente se utilizaron las cargas de viento y gravedad como parámetros de entrada en un segundo estudio de análisis estructural mediante elementos finitos, obteniendo las deformaciones estáticas tanto de las fuerzas como de la estructura de soporte del heliostato.

ABSTRACT

Modeling components of a Concentrated Solar Power plant (Solar Power Tower) such a Heliostat and the receptor is fundamental to predict the functionality and efficiency of the system. The Heliostat deformations caused by the wind and gravity loading affect its optical performance and distort the solar spot reflected into the receptor, thus lower have repercussions in the global efficiency of the plant. The well understanding of the effects of the wind and gravity load in the Heliostat structure is crucial to develop better Heliostat designs overall optimization of the structure without affecting stability and functionality. Throughout this work a wind load analysis in a 25 m² Heliostat is reported. This study was performed for different inclination angles and wind velocities using Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation. By CFD study the pressure distribution on the mirror surface of the Heliostat were obtained. Finally, the wind and gravity load were established as input parameters in a static study using Finite Element Analysis (FEA) getting the displacement of the Heliostat structure and tower.

Palabras clave: Heliostato, cargas de viento, deformación de fuerzas, CFD, FEA.

INTRODUCCIÓN

El uso de la energía solar como una fuente alternativa ha venido desarrollándose en los últimos años, debido a que es una fuente de energía limpia y sin costo. La conversión térmica de la energía solar se actualiza en sus tecnologías muy prometedora por una buena eficiencia de conversión y por la posibilidad de generar plantas de generación termosolar con costos gracias de potencia, los análisis que tipo de tecnología sea una se desarrollo basado reduce los costos de instalación y mejorar una alta eficiencia de planta (Koch et al., 2011). Entre muchas cosas por las cuales se se afectada la eficiencia de una planta termosolar, el presente artículo se enfoca en el análisis de la eficiencia de Heliostato, en la Plataforma Solar de Huelva. Uno de los problemas principales que afectan la eficiencia de la planta termosolar son las deformaciones de la estructura del Heliostato y sus soportes (Goffin et al., 2011) (Mora et al., 2014). Las perturbaciones, causadas por las deformaciones de la estructura, afectan directamente el factor de concentración solar en el receptor.

La deformación en la estructura del Heliostato se debe en su gran mayoría al peso de la estructura debido a la fuerza de gravedad (Mora and Del, 2011), y a la fuerza de viento causada por el viento la cual es función del área del Heliostato (Clement and Ho, 2000) (Ho et al., 2012). Para este trabajo la deformación causada por la acción de la fuerza de gravedad y la fuerza de soporte del viento se analizan mediante métodos de Elemento Finito (FEA) y volumen finito (CFD) utilizando el software SolidWorks. La estructura del Heliostato se diseñó en base a las recomendaciones de la deformación máxima permitida según el ángulo de apertura de los ejes reflejados desde el Heliostato hasta el concentrador y la maximización del peso de la estructura buscando disminuir el costo de fabricación. Para este estudio se realizaron distintos escenarios de trabajo con diferentes velocidades del viento e inclinaciones del Heliostato.



ISSN: 2448-5543

http://www.isdmex.com/PubSemNal/SNES_XXXIX/SNES_XXXIX_Portfolio.pdf

Ponente en congreso internacional de la XXXIX Semana Nacional de Energía Solar, Campeche, México.



MODELACIÓN DE CARGAS ESTÁTICAS PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA CPV DE DISCO PARABÓLICO.

V. Herrera Jiménez, C. Niebla Márquez y R. García Gutiérrez
Universidad de Sonora, Blvd. Luis Encinas y Rosales s/n, Col. Centro, Hermosillo Sonora, 8300 México

I. Salgado-Trinido
Unidad Agropecuaria, Centro de Investigaciones en Óptica, Prol. Construcción 607, Fracc. Reserva Loma Bonita, Apto. Apto., 20086
México. isalgadotr@ciqa.mx

C. Arancibia-Bulnes
Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México, Prol. Tecnológico s/n Col. Centro, Toluca México,
42900, México

RESUMEN

El presente trabajo contempla el diseño de un sistema fotovoltaico de concentración solar para la generación de energía eléctrica. El sistema está integrado por un concentrador de disco parabólico, un sistema óptico de Köhler para regular la distribución de la radiación solar concentrada y un arreglo de celdas fotovoltaicas de triple unión de alta eficiencia. Por facilidad para aproximar el sistema de seguimiento solar se muestran 12 concentradores parabólicos sobre una sola estructura solar, cada concentrador posee un sistema de conversión de potencia (arreglo de celdas solares) y comparte un sistema de enfriamiento centralizado. Para el diseño del mecanismo de seguimiento solar se estudian los efectos de las cargas de viento y gravedad sobre la estructura de soporte de los espejos y las unidades de conversión de potencia para así poder evaluar en un futuro los efectos en la pérdida del factor de concentración solar y en la eficiencia global del sistema.

ABSTRACT

This work involves the design of a solar power Concentrating Photovoltaic (CPV) system. The system is composed of parabolic dish concentrator, and secondary optical Köhler system to enhance the solar distribution over a high efficiency solar cells array of. In order to address the approximation of the solar tracking system, an array of 12 parabolic dish concentrator and their respective power conversion units are mounted on a single solar tracker. This enables them to share a single centralized cooling system. To design the solar tracking mechanism the effects of gravity and wind loads on the structure are evaluated. These results are useful to predict the effects of optical losses in the maintain solar concentration ratio reached and in the global efficiency of the system.

PALABRAS CLAVE: CPV, disco parabólico, cargas de viento, óptica de Köhler, FEA.

INTRODUCCIÓN

La urgencia de reducir la emisión de gases de efecto invernadero usando el aprovechamiento de los combustibles fósiles hace necesario el desarrollo de nuevas fuentes de energía más amigables con el medio ambiente. La generación de electricidad mediante fuentes renovables de energía es una de las alternativas más factibles. Dentro de ellas la energía solar por su abundancia y disponibilidad es la más prometedora [Lewin, 2007]. Para generación de potencia las principales tecnologías solares son la térmica y la fotovoltaica.

El presente proyecto contempla el diseño de un sistema de generación de energía eléctrica basado en el prototipo desarrollado por investigadores de la Universidad de Arizona [Burt et al., 2011][Aragal et al., 2011][Coughlan et al., 2013]. El sistema está compuesto por un concentrador solar de disco parabólico y un sistema fotovoltaico de concentración avanzado integrado por celdas de triple unión de alta eficiencia y dispositivos semiconductor [Aragal, 2013]. Para mejorar la distribución del flujo de radiación solar y minimizar los problemas de temperatura sobre las celdas solares, se añade un sistema óptico secundario del tipo de Köhler [Aragal et al., 2011][Coughlan et al., 2014]. Para fines de aproximar el diseño del sistema se muestra sobre 1 sola estructura de seguimiento solar, 12 espejos de disco parabólico, con sus respectivas unidades de conversión de potencia. La ventaja es la reducción del costo específico del sistema de seguimiento, y la posibilidad de contar con unidades de enfriamiento centralizadas. Para ello se debe diseñar el mecanismo de seguimiento solar y estudiar los efectos de las cargas de viento sobre las deformaciones de la estructura de soporte de los espejos y las unidades de conversión de potencia [Carmichael and Ho, 2010][Patek, J.A. Demchuk], así como determinar las deformaciones de todo el seguidor por efectos de la gravedad.

Resultados en lo anterior, este trabajo se enfoca en el estudio de las deformaciones causadas por la acción de la gravedad y la fuerza de arrastre del viento mediante técnicas elementales de Elemento Finito (FEA) y volumen finito (CFD) utilizando el software SolidWorks.



ISSN: 2448-5543

http://www.isdmex.com/PubSemNal/SNES_XXXIX/SNES_XXXIX_Portfolio.pdf

Memoria de congreso internacional International Conference on Electronics, Mechatronics and Automation (ICEMA 2015)

Design of a Linear Actuator Driven Solar Tracker for High Concentration Photovoltaics Technologies

Christian Dávila-Peralta^{1,*}, Víctor Herrera-Jiménez^{1,2}, Rafael Cabanillas-López^{1,c}, Rafael García-Gutiérrez^{1,2} and Ricardo Rodríguez-Carvajal^{1,*}

¹Universidad de Sonora, Blvd. Luis Encinas y Calle Rosales S/N, Col. Centro, Hermosillo, Sonora México.

²cdavila@vinculacion.uson.mx, ²vherrera@industrial.uson.mx, ²rcabanil@iq.uson.mx, ²rgarcia@cifus.uson.mx, ²ricardo@industrial.uson.mx

Keywords: Solar Tracker, Automation, CPV, Finite Element Analysis.

Abstract. A CPV solar tracker design is described using CAE tools. A virtual wind tunnel simulation and finite element analysis software to calculate the stress and deformation is used. A 'tilt-roll' tracker employs an inexpensive linear actuator and dampers system to drive the tilt axis, also a bar mechanism driven with another linear actuator in the 'roll' axis is utilized. The process to calculate the aperture angle losses caused by the wind drag is discussed.

Introduction

The CPV technology transforms solar radiation to electric energy. This process requires tracking the apparent moving of the sun along the day. To that purpose, it must integrate an automatic structure capable to track the sun, and place the optics of the concentrator in a way that the direct solar radiation is always focused on the modules during the day [1].

According to Angel [2], HCPV technology should compete successfully against the fossil based electricity generation dropping total installation costs respect to flat PV systems. There are various types of solar tracking mechanisms described in literature. Mousazadeh [3] analyzed the principles and methods of solar tracking to maximize the power output of solar systems, finding that the most popular and efficient tracking architectures are the polar axis and altazimuth systems. Actually most of the commercially available CPV systems use a 2 axis tracking in an altazimuth configuration with a pedestal tracker followed by the 'tilt-roll' or 'polar' configuration.

The function of a concentration solar tracker is align permanently the aiming axis of the concentration system with the local solar vector, in a way that the maximum power output is produced. In flat PV systems the solar tracking will enhance the power gain of a PV array, but in this installation exists some issues like the cost, liability, energy consumption, maintenance and performance, which should be taken into account [3].

For the layout of solar trackers the wind loads are critical and therefore they should be known as precisely as possible [4]. The operation conditions for solar trackers consist in set a maximum wind speed value during the operation of tracking. The higher is this wind speed, the heavier and more expensive the structure will be in order to keep the deformations below a level for an accurate tracking. An economical and efficient approach is to determine the maximum service wind speed (MSWS) by a cross-correlation between the wind speed and the direct solar radiation, in the site in which is planned to install the tracker. When the wind speed is above this value, the stiffness specs are not to be accomplished and the tracker can change to stow mode where the wind drag reduces to its minimum.

The wind loads produces stress and deformation in the tracker components and it must be calculated to ensure, first its structural reliability, and second, the effect of the deformations in the

ISSN 1660-9336 http://www.irsitio.com/refbase/documentos/214_Davila-Peralta_etal2015.pdf

Solicitud de patente.

Mecanismo de seguimiento solar de dos ejes operado con actuadores lineales para paneles de alta concentración y planos.

Christian Dávila Peralta, Víctor Manuel Herrera Jiménez, Ricardo Alberto Rodríguez Carvajal

24/09/2014

MX/a/2014/012221

09/09/2014 RDR



INSTITUTO MEXICANO DE LA PROPIEDAD INDUSTRIAL
Dirección Divisiva de Patentes

OFICINA REGIONAL DE OCCIDENTE

Solicitud: MK/a/2014/012221
Expediente: 24/SEP/2014 Hora: 13:55:00
Folio: MK/E/2014/072386 95648



☒ Solicitud de Patente
☐ Solicitud de Registro de Modelo de Utilidad

☐ Solicitud de Registro de Diseño Industrial, especifique cuál:
☐ Modelo Industrial ☐ Dibujo Industrial

Antes de llenar la forma lee las consideraciones generales al reverso

001423

Uso exclusivo Delegaciones y Subdelegaciones de la Secretaría de Economía y Oficinas Regionales del IMPI

Señalado de entrada

RECIBID

Fecha y hora de recepción

I DATOS DEL (DE LOS) SOLICITANTE(S)

El solicitante es el inventor ☐ El solicitante es el causahabiente ☒

1) Nombre (s): Universidad de Sonora

2) Nacionalidad (es): Mexicana

3) Domicilio: calle, número, colonia y código postal: Boulevard Luis Encinas Johnson sin número, colonia Centro, C.P. 83000

Población, Estado y País: Hermosillo, Sonora, México

4) Teléfono (clave): (662) 259 21 36 5) Fax (clave):

II DATOS DEL (DE LOS) INVENTOR(ES)

6) Nombre (s): Christian Dávila Peralta; Victor Manuel Herrera Jiménez; Ricardo Alberto Rodríguez Carvajal

7) Nacionalidad (es): Mexicano, Mexicano, Mexicano

8) Domicilio: calle, número, colonia y código postal: Carrada San José 53, colonia Coronado Residencial, C.P. 83249; Sexta 1, colonia Centro, C.P. 83000; Penitencia Norte 278, colonia Balderrama C.P. 83180

Población, Estado y País: Hermosillo, Sonora, México; Hermosillo, Sonora, México; Hermosillo, Sonora, México

9) Teléfono (clave): (662) 290 22 58; (662) 948 47 42; (662) 214 42 00 10) Fax (clave):

III DATOS DEL (DE LOS) APODERADO(S)

11) Nombre (s): Pedro Augusto Sabori Sandoval 12) R.G.P.

13) Domicilio: calle, número, colonia y código postal: Boulevard Las Quintas 55, colonia Santa Fe, C.P. 83249

Población, Estado y País: Hermosillo, Sonora, México 14) Teléfono (clave): (662) 218 66 60 15) Fax (clave):

16) Personas Autorizadas para oír y recibir notificaciones: Christian Dávila Peralta

17) Denominación o Título de la invención:

MECANISMO DE SEGUIMIENTO SOLAR DE DOS EJES OPERADO CON ACTUADORES LINEALES PARA PANELES DE ALTA CONCENTRACIÓN Y PLANOS

18) Fecha de divulgación previa

19) Clasificación internacional uso exclusivo del IMPI

20) Divisional de la solicitud

21) Fecha de presentación

22) Prioridad Reclamada:

País

Figura jurídica

Fecha de presentación

No. de serie

Lista de verificación (uso interno)

No. Hojas

Comprobante de pago de la tarifa

Descripción y reivindicación (es) de la invención

Dibujo (s) en su caso

Resumen de la descripción de la invención

Documento que acredita la personalidad del apoderado

Documento de cesión de derechos

Constancia de depósito de material biológico

Documento (s) comprobatorio(s) de divulgación previa

Documento (s) de prioridad

Traducción

TOTAL DE HOJAS

Observaciones:

Bajo protesta de decir verdad, manifiesto que los datos asentados en esta solicitud son ciertos.

Pedro Augusto Sabori Sandoval

Hermosillo, Sonora a 24 de septiembre de 2014

Nombre y firma del solicitante o su apoderado

Lugar y fecha

Apéndice 4.

Resultados de algoritmo NREL para el día 23 de mayo del 2016 de las 6:30 a las 12:22 horas, con un intervalo de tiempo de 30 segundos.

Fecha, Hora, ángulo zenit, ángulo azimut

5/23/2016,6:30:00,77.771823,72.885916	5/23/2016,6:57:00,72.108591,75.734728
5/23/2016,6:30:30,77.667827,72.939594	5/23/2016,6:57:30,72.002896,75.786675
5/23/2016,6:31:00,77.563795,72.993232	5/23/2016,6:58:00,71.897175,75.838599
5/23/2016,6:31:30,77.459725,73.046831	5/23/2016,6:58:30,71.791426,75.890499
5/23/2016,6:32:00,77.355619,73.100390	5/23/2016,6:59:00,71.685651,75.942375
5/23/2016,6:32:30,77.251477,73.153910	5/23/2016,6:59:30,71.579850,75.994229
5/23/2016,6:33:00,77.147299,73.207392	5/23/2016,7:00:00,71.474022,76.046061
5/23/2016,6:33:30,77.043086,73.260834	5/23/2016,7:00:30,71.368168,76.097870
5/23/2016,6:34:00,76.938836,73.314239	5/23/2016,7:01:00,71.262289,76.149657
5/23/2016,6:34:30,76.834552,73.367606	5/23/2016,7:01:30,71.156383,76.201423
5/23/2016,6:35:00,76.730233,73.420935	5/23/2016,7:02:00,71.050451,76.253167
5/23/2016,6:35:30,76.625878,73.474227	5/23/2016,7:02:30,70.944494,76.304891
5/23/2016,6:36:00,76.521490,73.527482	5/23/2016,7:03:00,70.838511,76.356593
5/23/2016,6:36:30,76.417066,73.580700	5/23/2016,7:03:30,70.732503,76.408276
5/23/2016,6:37:00,76.312609,73.633881	5/23/2016,7:04:00,70.626470,76.459938
5/23/2016,6:37:30,76.208118,73.687027	5/23/2016,7:04:30,70.520411,76.511581
5/23/2016,6:38:00,76.103594,73.740137	5/23/2016,7:05:00,70.414328,76.563204
5/23/2016,6:38:30,75.999036,73.793211	5/23/2016,7:05:30,70.308220,76.614808
5/23/2016,6:39:00,75.894444,73.846250	5/23/2016,7:06:00,70.202087,76.666393
5/23/2016,6:39:30,75.789820,73.899254	5/23/2016,7:06:30,70.095929,76.717960
5/23/2016,6:40:00,75.685163,73.952224	5/23/2016,7:07:00,69.989747,76.769509
5/23/2016,6:40:30,75.580473,74.005159	5/23/2016,7:07:30,69.883540,76.821039
5/23/2016,6:41:00,75.475751,74.058060	5/23/2016,7:08:00,69.777309,76.872553
5/23/2016,6:41:30,75.370996,74.110927	5/23/2016,7:08:30,69.671054,76.924049
5/23/2016,6:42:00,75.266210,74.163761	5/23/2016,7:09:00,69.564775,76.975528
5/23/2016,6:42:30,75.161392,74.216562	5/23/2016,7:09:30,69.458472,77.026991
5/23/2016,6:43:00,75.056542,74.269330	5/23/2016,7:10:00,69.352145,77.078437
5/23/2016,6:43:30,74.951660,74.322066	5/23/2016,7:10:30,69.245795,77.129867
5/23/2016,6:44:00,74.846748,74.374769	5/23/2016,7:11:00,69.139421,77.181282
5/23/2016,6:44:30,74.741804,74.427441	5/23/2016,7:11:30,69.033023,77.232681
5/23/2016,6:45:00,74.636829,74.480080	5/23/2016,7:12:00,68.926602,77.284066
5/23/2016,6:45:30,74.531823,74.532689	5/23/2016,7:12:30,68.820159,77.335435
5/23/2016,6:46:00,74.426787,74.585266	5/23/2016,7:13:00,68.713691,77.386791
5/23/2016,6:46:30,74.321721,74.637813	5/23/2016,7:13:30,68.607201,77.438132
5/23/2016,6:47:00,74.216624,74.690329	5/23/2016,7:14:00,68.500689,77.489460
5/23/2016,6:47:30,74.111497,74.742815	5/23/2016,7:14:30,68.394153,77.540774
5/23/2016,6:48:00,74.006341,74.795271	5/23/2016,7:15:00,68.287595,77.592076
5/23/2016,6:48:30,73.901154,74.847698	5/23/2016,7:15:30,68.181014,77.643364
5/23/2016,6:49:00,73.795938,74.900096	5/23/2016,7:16:00,68.074411,77.694640
5/23/2016,6:49:30,73.690693,74.952464	5/23/2016,7:16:30,67.967785,77.745904
5/23/2016,6:50:00,73.585418,75.004804	5/23/2016,7:17:00,67.861138,77.797157
5/23/2016,6:50:30,73.480115,75.057116	5/23/2016,7:17:30,67.754468,77.848397
5/23/2016,6:51:00,73.374782,75.109400	5/23/2016,7:18:00,67.647776,77.899627
5/23/2016,6:51:30,73.269421,75.161655	5/23/2016,7:18:30,67.541063,77.950846
5/23/2016,6:52:00,73.164031,75.213884	5/23/2016,7:19:00,67.434327,78.002055
5/23/2016,6:52:30,73.058612,75.266085	5/23/2016,7:19:30,67.327570,78.053253
5/23/2016,6:53:00,72.953166,75.318260	5/23/2016,7:20:00,67.220792,78.104442
5/23/2016,6:53:30,72.847691,75.370408	5/23/2016,7:20:30,67.113992,78.155621
5/23/2016,6:54:00,72.742188,75.422530	5/23/2016,7:21:00,67.007170,78.206791
5/23/2016,6:54:30,72.636657,75.474626	5/23/2016,7:21:30,66.900328,78.257953
5/23/2016,6:55:00,72.531099,75.526696	5/23/2016,7:22:00,66.793464,78.309106
5/23/2016,6:55:30,72.425513,75.578742	5/23/2016,7:22:30,66.686579,78.360250
5/23/2016,6:56:00,72.319900,75.630762	5/23/2016,7:23:00,66.579674,78.411388
5/23/2016,6:56:30,72.214259,75.682757	5/23/2016,7:23:30,66.472747,78.462517

5/23/2016,7:24:00,66.365800,78.513640
5/23/2016,7:24:30,66.258833,78.564755
5/23/2016,7:25:00,66.151844,78.615865
5/23/2016,7:25:30,66.044836,78.666968
5/23/2016,7:26:00,65.937807,78.718066
5/23/2016,7:26:30,65.830758,78.769158
5/23/2016,7:27:00,65.723689,78.820245
5/23/2016,7:27:30,65.616600,78.871327
5/23/2016,7:28:00,65.509491,78.922405
5/23/2016,7:28:30,65.402362,78.973479
5/23/2016,7:29:00,65.295213,79.024550
5/23/2016,7:29:30,65.188045,79.075617
5/23/2016,7:30:00,65.080858,79.126681
5/23/2016,7:30:30,64.973651,79.177742
5/23/2016,7:31:00,64.866424,79.228801
5/23/2016,7:31:30,64.759179,79.279859
5/23/2016,7:32:00,64.651914,79.330914
5/23/2016,7:32:30,64.544631,79.381969
5/23/2016,7:33:00,64.437328,79.433023
5/23/2016,7:33:30,64.330007,79.484076
5/23/2016,7:34:00,64.222667,79.535129
5/23/2016,7:34:30,64.115308,79.586182
5/23/2016,7:35:00,64.007931,79.637236
5/23/2016,7:35:30,63.900536,79.688291
5/23/2016,7:36:00,63.793122,79.739347
5/23/2016,7:36:30,63.685690,79.790405
5/23/2016,7:37:00,63.578240,79.841464
5/23/2016,7:37:30,63.470771,79.892527
5/23/2016,7:38:00,63.363285,79.943592
5/23/2016,7:38:30,63.255781,79.994660
5/23/2016,7:39:00,63.148259,80.045731
5/23/2016,7:39:30,63.040720,80.096807
5/23/2016,7:40:00,62.933163,80.147887
5/23/2016,7:40:30,62.825588,80.198971
5/23/2016,7:41:00,62.717996,80.250060
5/23/2016,7:41:30,62.610387,80.301155
5/23/2016,7:42:00,62.502761,80.352256
5/23/2016,7:42:30,62.395117,80.403362
5/23/2016,7:43:00,62.287457,80.454475
5/23/2016,7:43:30,62.179779,80.505596
5/23/2016,7:44:00,62.072085,80.556723
5/23/2016,7:44:30,61.964374,80.607858
5/23/2016,7:45:00,61.856646,80.659001
5/23/2016,7:45:30,61.748902,80.710153
5/23/2016,7:46:00,61.641142,80.761313
5/23/2016,7:46:30,61.533365,80.812483
5/23/2016,7:47:00,61.425571,80.863662
5/23/2016,7:47:30,61.317762,80.914851
5/23/2016,7:48:00,61.209936,80.966051
5/23/2016,7:48:30,61.102095,81.017261
5/23/2016,7:49:00,60.994237,81.068483
5/23/2016,7:49:30,60.886364,81.119716
5/23/2016,7:50:00,60.778475,81.170961
5/23/2016,7:50:30,60.670570,81.222219
5/23/2016,7:51:00,60.562650,81.273489
5/23/2016,7:51:30,60.454714,81.324773
5/23/2016,7:52:00,60.346763,81.376070
5/23/2016,7:52:30,60.238796,81.427382
5/23/2016,7:53:00,60.130815,81.478708
5/23/2016,7:53:30,60.022818,81.530048
5/23/2016,7:54:00,59.914806,81.581404
5/23/2016,7:54:30,59.806779,81.632776

5/23/2016,7:55:00,59.698738,81.684164
5/23/2016,7:55:30,59.590681,81.735568
5/23/2016,7:56:00,59.482610,81.786990
5/23/2016,7:56:30,59.374525,81.838428
5/23/2016,7:57:00,59.266425,81.889885
5/23/2016,7:57:30,59.158310,81.941360
5/23/2016,7:58:00,59.050181,81.992853
5/23/2016,7:58:30,58.942038,82.044366
5/23/2016,7:59:00,58.833881,82.095898
5/23/2016,7:59:30,58.725710,82.147450
5/23/2016,8:00:00,58.617525,82.199023
5/23/2016,8:00:30,58.509326,82.250616
5/23/2016,8:01:00,58.401113,82.302231
5/23/2016,8:01:30,58.292886,82.353868
5/23/2016,8:02:00,58.184646,82.405527
5/23/2016,8:02:30,58.076392,82.457208
5/23/2016,8:03:00,57.968125,82.508913
5/23/2016,8:03:30,57.859844,82.560641
5/23/2016,8:04:00,57.751551,82.612393
5/23/2016,8:04:30,57.643244,82.664170
5/23/2016,8:05:00,57.534923,82.715971
5/23/2016,8:05:30,57.426590,82.767798
5/23/2016,8:06:00,57.318244,82.819651
5/23/2016,8:06:30,57.209885,82.871530
5/23/2016,8:07:00,57.101514,82.923436
5/23/2016,8:07:30,56.993129,82.975370
5/23/2016,8:08:00,56.884733,83.027331
5/23/2016,8:08:30,56.776323,83.079320
5/23/2016,8:09:00,56.667902,83.131338
5/23/2016,8:09:30,56.559468,83.183386
5/23/2016,8:10:00,56.451021,83.235463
5/23/2016,8:10:30,56.342563,83.287570
5/23/2016,8:11:00,56.234092,83.339708
5/23/2016,8:11:30,56.125610,83.391877
5/23/2016,8:12:00,56.017116,83.444078
5/23/2016,8:12:30,55.908610,83.496311
5/23/2016,8:13:00,55.800092,83.548576
5/23/2016,8:13:30,55.691563,83.600875
5/23/2016,8:14:00,55.583022,83.653207
5/23/2016,8:14:30,55.474469,83.705574
5/23/2016,8:15:00,55.365906,83.757976
5/23/2016,8:15:30,55.257331,83.810412
5/23/2016,8:16:00,55.148744,83.862885
5/23/2016,8:16:30,55.040147,83.915393
5/23/2016,8:17:00,54.931539,83.967939
5/23/2016,8:17:30,54.822920,84.020522
5/23/2016,8:18:00,54.714290,84.073142
5/23/2016,8:18:30,54.605649,84.125801
5/23/2016,8:19:00,54.496997,84.178499
5/23/2016,8:19:30,54.388335,84.231237
5/23/2016,8:20:00,54.279663,84.284014
5/23/2016,8:20:30,54.170980,84.336832
5/23/2016,8:21:00,54.062287,84.389691
5/23/2016,8:21:30,53.953584,84.442592
5/23/2016,8:22:00,53.844870,84.495535
5/23/2016,8:22:30,53.736146,84.548521
5/23/2016,8:23:00,53.627413,84.601551
5/23/2016,8:23:30,53.518670,84.654624
5/23/2016,8:24:00,53.409916,84.707741
5/23/2016,8:24:30,53.301154,84.760904
5/23/2016,8:25:00,53.192381,84.814113
5/23/2016,8:25:30,53.083599,84.867367

5/23/2016,8:26:00,52.974808,84.920669
5/23/2016,8:26:30,52.866007,84.974018
5/23/2016,8:27:00,52.757197,85.027415
5/23/2016,8:27:30,52.648378,85.080860
5/23/2016,8:28:00,52.539550,85.134355
5/23/2016,8:28:30,52.430713,85.187900
5/23/2016,8:29:00,52.321867,85.241495
5/23/2016,8:29:30,52.213012,85.295141
5/23/2016,8:30:00,52.104148,85.348838
5/23/2016,8:30:30,51.995276,85.402589
5/23/2016,8:31:00,51.886396,85.456391
5/23/2016,8:31:30,51.777507,85.510248
5/23/2016,8:32:00,51.668609,85.564159
5/23/2016,8:32:30,51.559703,85.618124
5/23/2016,8:33:00,51.450790,85.672145
5/23/2016,8:33:30,51.341868,85.726222
5/23/2016,8:34:00,51.232938,85.780356
5/23/2016,8:34:30,51.124000,85.834547
5/23/2016,8:35:00,51.015054,85.888796
5/23/2016,8:35:30,50.906101,85.943104
5/23/2016,8:36:00,50.797140,85.997472
5/23/2016,8:36:30,50.688172,86.051899
5/23/2016,8:37:00,50.579196,86.106387
5/23/2016,8:37:30,50.470213,86.160937
5/23/2016,8:38:00,50.361222,86.215549
5/23/2016,8:38:30,50.252225,86.270223
5/23/2016,8:39:00,50.143220,86.324962
5/23/2016,8:39:30,50.034208,86.379764
5/23/2016,8:40:00,49.925190,86.434632
5/23/2016,8:40:30,49.816164,86.489565
5/23/2016,8:41:00,49.707133,86.544564
5/23/2016,8:41:30,49.598094,86.599631
5/23/2016,8:42:00,49.489049,86.654765
5/23/2016,8:42:30,49.379998,86.709968
5/23/2016,8:43:00,49.270940,86.765240
5/23/2016,8:43:30,49.161876,86.820582
5/23/2016,8:44:00,49.052806,86.875995
5/23/2016,8:44:30,48.943730,86.931480
5/23/2016,8:45:00,48.834648,86.987037
5/23/2016,8:45:30,48.725560,87.042667
5/23/2016,8:46:00,48.616467,87.098371
5/23/2016,8:46:30,48.507368,87.154150
5/23/2016,8:47:00,48.398263,87.210004
5/23/2016,8:47:30,48.289153,87.265934
5/23/2016,8:48:00,48.180038,87.321941
5/23/2016,8:48:30,48.070917,87.378027
5/23/2016,8:49:00,47.961792,87.434190
5/23/2016,8:49:30,47.852661,87.490434
5/23/2016,8:50:00,47.743525,87.546757
5/23/2016,8:50:30,47.634385,87.603162
5/23/2016,8:51:00,47.525239,87.659649
5/23/2016,8:51:30,47.416089,87.716218
5/23/2016,8:52:00,47.306935,87.772871
5/23/2016,8:52:30,47.197776,87.829609
5/23/2016,8:53:00,47.088613,87.886432
5/23/2016,8:53:30,46.979446,87.943341
5/23/2016,8:54:00,46.870274,88.000337
5/23/2016,8:54:30,46.761099,88.057421
5/23/2016,8:55:00,46.651919,88.114595
5/23/2016,8:55:30,46.542736,88.171858
5/23/2016,8:56:00,46.433549,88.229211
5/23/2016,8:56:30,46.324359,88.286657

5/23/2016,8:57:00,46.215165,88.344195
5/23/2016,8:57:30,46.105968,88.401826
5/23/2016,8:58:00,45.996767,88.459552
5/23/2016,8:58:30,45.887563,88.517373
5/23/2016,8:59:00,45.778357,88.575290
5/23/2016,8:59:30,45.669147,88.633305
5/23/2016,9:00:00,45.559934,88.691418
5/23/2016,9:00:30,45.450719,88.749630
5/23/2016,9:01:00,45.341501,88.807942
5/23/2016,9:01:30,45.232280,88.866356
5/23/2016,9:02:00,45.123057,88.924871
5/23/2016,9:02:30,45.013832,88.983490
5/23/2016,9:03:00,44.904605,89.042213
5/23/2016,9:03:30,44.795376,89.101042
5/23/2016,9:04:00,44.686144,89.159976
5/23/2016,9:04:30,44.576911,89.219018
5/23/2016,9:05:00,44.467676,89.278169
5/23/2016,9:05:30,44.358440,89.337429
5/23/2016,9:06:00,44.249202,89.396799
5/23/2016,9:06:30,44.139962,89.456281
5/23/2016,9:07:00,44.030722,89.515876
5/23/2016,9:07:30,43.921480,89.575584
5/23/2016,9:08:00,43.812237,89.635408
5/23/2016,9:08:30,43.702993,89.695347
5/23/2016,9:09:00,43.593749,89.755404
5/23/2016,9:09:30,43.484503,89.815579
5/23/2016,9:10:00,43.375258,89.875873
5/23/2016,9:10:30,43.266012,89.936288
5/23/2016,9:11:00,43.156765,89.996825
5/23/2016,9:11:30,43.047519,90.057485
5/23/2016,9:12:00,42.938272,90.118269
5/23/2016,9:12:30,42.829025,90.179179
5/23/2016,9:13:00,42.719779,90.240215
5/23/2016,9:13:30,42.610533,90.301379
5/23/2016,9:14:00,42.501287,90.362672
5/23/2016,9:14:30,42.392042,90.424096
5/23/2016,9:15:00,42.282798,90.485651
5/23/2016,9:15:30,42.173554,90.547339
5/23/2016,9:16:00,42.064311,90.609161
5/23/2016,9:16:30,41.955070,90.671118
5/23/2016,9:17:00,41.845830,90.733213
5/23/2016,9:17:30,41.736591,90.795445
5/23/2016,9:18:00,41.627353,90.857817
5/23/2016,9:18:30,41.518117,90.920330
5/23/2016,9:19:00,41.408883,90.982985
5/23/2016,9:19:30,41.299651,91.045784
5/23/2016,9:20:00,41.190421,91.108727
5/23/2016,9:20:30,41.081193,91.171817
5/23/2016,9:21:00,40.971968,91.235055
5/23/2016,9:21:30,40.862744,91.298441
5/23/2016,9:22:00,40.753524,91.361979
5/23/2016,9:22:30,40.644306,91.425668
5/23/2016,9:23:00,40.535091,91.489511
5/23/2016,9:23:30,40.425879,91.553510
5/23/2016,9:24:00,40.316670,91.617664
5/23/2016,9:24:30,40.207464,91.681977
5/23/2016,9:25:00,40.098262,91.746450
5/23/2016,9:25:30,39.989064,91.811083
5/23/2016,9:26:00,39.879869,91.875880
5/23/2016,9:26:30,39.770678,91.940841
5/23/2016,9:27:00,39.661492,92.005967
5/23/2016,9:27:30,39.552309,92.071261

5/23/2016,9:28:00,39.443131,92.136725
5/23/2016,9:28:30,39.333957,92.202359
5/23/2016,9:29:00,39.224788,92.268166
5/23/2016,9:29:30,39.115624,92.334146
5/23/2016,9:30:00,39.006465,92.400303
5/23/2016,9:30:30,38.897311,92.466637
5/23/2016,9:31:00,38.788162,92.533151
5/23/2016,9:31:30,38.679019,92.599845
5/23/2016,9:32:00,38.569881,92.666723
5/23/2016,9:32:30,38.460750,92.733785
5/23/2016,9:33:00,38.351624,92.801033
5/23/2016,9:33:30,38.242504,92.868470
5/23/2016,9:34:00,38.133391,92.936097
5/23/2016,9:34:30,38.024284,93.003916
5/23/2016,9:35:00,37.915184,93.071928
5/23/2016,9:35:30,37.806090,93.140137
5/23/2016,9:36:00,37.697004,93.208543
5/23/2016,9:36:30,37.587924,93.277149
5/23/2016,9:37:00,37.478852,93.345956
5/23/2016,9:37:30,37.369788,93.414967
5/23/2016,9:38:00,37.260731,93.484184
5/23/2016,9:38:30,37.151683,93.553608
5/23/2016,9:39:00,37.042642,93.623242
5/23/2016,9:39:30,36.933610,93.693088
5/23/2016,9:40:00,36.824586,93.763147
5/23/2016,9:40:30,36.715570,93.833423
5/23/2016,9:41:00,36.606564,93.903917
5/23/2016,9:41:30,36.497567,93.974631
5/23/2016,9:42:00,36.388578,94.045568
5/23/2016,9:42:30,36.279600,94.116729
5/23/2016,9:43:00,36.170631,94.188118
5/23/2016,9:43:30,36.061671,94.259735
5/23/2016,9:44:00,35.952722,94.331584
5/23/2016,9:44:30,35.843783,94.403668
5/23/2016,9:45:00,35.734855,94.475987
5/23/2016,9:45:30,35.625937,94.548545
5/23/2016,9:46:00,35.517030,94.621344
5/23/2016,9:46:30,35.408134,94.694387
5/23/2016,9:47:00,35.299249,94.767675
5/23/2016,9:47:30,35.190376,94.841212
5/23/2016,9:48:00,35.081514,94.915000
5/23/2016,9:48:30,34.972665,94.989041
5/23/2016,9:49:00,34.863828,95.063338
5/23/2016,9:49:30,34.755003,95.137894
5/23/2016,9:50:00,34.646190,95.212712
5/23/2016,9:50:30,34.537391,95.287793
5/23/2016,9:51:00,34.428605,95.363141
5/23/2016,9:51:30,34.319832,95.438758
5/23/2016,9:52:00,34.211072,95.514648
5/23/2016,9:52:30,34.102327,95.590812
5/23/2016,9:53:00,33.993595,95.667255
5/23/2016,9:53:30,33.884878,95.743978
5/23/2016,9:54:00,33.776175,95.820984
5/23/2016,9:54:30,33.667488,95.898277
5/23/2016,9:55:00,33.558815,95.975860
5/23/2016,9:55:30,33.450157,96.053735
5/23/2016,9:56:00,33.341515,96.131905
5/23/2016,9:56:30,33.232889,96.210374
5/23/2016,9:57:00,33.124279,96.289145
5/23/2016,9:57:30,33.015686,96.368221
5/23/2016,9:58:00,32.907109,96.447605
5/23/2016,9:58:30,32.798548,96.527300

5/23/2016,9:59:00,32.690006,96.607310
5/23/2016,9:59:30,32.581480,96.687638
5/23/2016,10:00:00,32.472972,96.768287
5/23/2016,10:00:30,32.364483,96.849260
5/23/2016,10:01:00,32.256012,96.930562
5/23/2016,10:01:30,32.147559,97.012196
5/23/2016,10:02:00,32.039125,97.094164
5/23/2016,10:02:30,31.930711,97.176472
5/23/2016,10:03:00,31.822316,97.259121
5/23/2016,10:03:30,31.713941,97.342117
5/23/2016,10:04:00,31.605586,97.425463
5/23/2016,10:04:30,31.497251,97.509162
5/23/2016,10:05:00,31.388938,97.593218
5/23/2016,10:05:30,31.280645,97.677635
5/23/2016,10:06:00,31.172374,97.762418
5/23/2016,10:06:30,31.064124,97.847569
5/23/2016,10:07:00,30.955897,97.933094
5/23/2016,10:07:30,30.847692,98.018996
5/23/2016,10:08:00,30.739510,98.105279
5/23/2016,10:08:30,30.631351,98.191948
5/23/2016,10:09:00,30.523216,98.279006
5/23/2016,10:09:30,30.415104,98.366458
5/23/2016,10:10:00,30.307017,98.454309
5/23/2016,10:10:30,30.198954,98.542562
5/23/2016,10:11:00,30.090916,98.631222
5/23/2016,10:11:30,29.982903,98.720294
5/23/2016,10:12:00,29.874917,98.809783
5/23/2016,10:12:30,29.766956,98.899692
5/23/2016,10:13:00,29.659022,98.990027
5/23/2016,10:13:30,29.551114,99.080793
5/23/2016,10:14:00,29.443234,99.171993
5/23/2016,10:14:30,29.335381,99.263634
5/23/2016,10:15:00,29.227557,99.355720
5/23/2016,10:15:30,29.119761,99.448256
5/23/2016,10:16:00,29.011994,99.541247
5/23/2016,10:16:30,28.904257,99.634699
5/23/2016,10:17:00,28.796549,99.728617
5/23/2016,10:17:30,28.688871,99.823005
5/23/2016,10:18:00,28.581224,99.917871
5/23/2016,10:18:30,28.473608,100.013218
5/23/2016,10:19:00,28.366024,100.109052
5/23/2016,10:19:30,28.258472,100.205380
5/23/2016,10:20:00,28.150952,100.302206
5/23/2016,10:20:30,28.043465,100.399537
5/23/2016,10:21:00,27.936012,100.497379
5/23/2016,10:21:30,27.828593,100.595737
5/23/2016,10:22:00,27.721208,100.694618
5/23/2016,10:22:30,27.613858,100.794027
5/23/2016,10:23:00,27.506544,100.893971
5/23/2016,10:23:30,27.399265,100.994456
5/23/2016,10:24:00,27.292024,101.095489
5/23/2016,10:24:30,27.184819,101.197076
5/23/2016,10:25:00,27.077652,101.299224
5/23/2016,10:25:30,26.970523,101.401939
5/23/2016,10:26:00,26.863432,101.505228
5/23/2016,10:26:30,26.756381,101.609098
5/23/2016,10:27:00,26.649370,101.713557
5/23/2016,10:27:30,26.542400,101.818610
5/23/2016,10:28:00,26.435470,101.924266
5/23/2016,10:28:30,26.328582,102.030532
5/23/2016,10:29:00,26.221736,102.137414
5/23/2016,10:29:30,26.114933,102.244921

5/23/2016,10:30:00,26.008174,102.353061
5/23/2016,10:30:30,25.901458,102.461840
5/23/2016,10:31:00,25.794788,102.571268
5/23/2016,10:31:30,25.688162,102.681351
5/23/2016,10:32:00,25.581583,102.792098
5/23/2016,10:32:30,25.475051,102.903518
5/23/2016,10:33:00,25.368566,103.015618
5/23/2016,10:33:30,25.262130,103.128407
5/23/2016,10:34:00,25.155742,103.241895
5/23/2016,10:34:30,25.049404,103.356088
5/23/2016,10:35:00,24.943116,103.470997
5/23/2016,10:35:30,24.836879,103.586631
5/23/2016,10:36:00,24.730694,103.702998
5/23/2016,10:36:30,24.624562,103.820108
5/23/2016,10:37:00,24.518483,103.937971
5/23/2016,10:37:30,24.412459,104.056595
5/23/2016,10:38:00,24.306489,104.175992
5/23/2016,10:38:30,24.200575,104.296170
5/23/2016,10:39:00,24.094718,104.417140
5/23/2016,10:39:30,23.988918,104.538912
5/23/2016,10:40:00,23.883177,104.661497
5/23/2016,10:40:30,23.777495,104.784905
5/23/2016,10:41:00,23.671873,104.909147
5/23/2016,10:41:30,23.566312,105.034233
5/23/2016,10:42:00,23.460813,105.160176
5/23/2016,10:42:30,23.355376,105.286985
5/23/2016,10:43:00,23.250004,105.414673
5/23/2016,10:43:30,23.144697,105.543252
5/23/2016,10:44:00,23.039455,105.672733
5/23/2016,10:44:30,22.934280,105.803127
5/23/2016,10:45:00,22.829173,105.934449
5/23/2016,10:45:30,22.724135,106.066709
5/23/2016,10:46:00,22.619167,106.199920
5/23/2016,10:46:30,22.514269,106.334096
5/23/2016,10:47:00,22.409444,106.469249
5/23/2016,10:47:30,22.304692,106.605393
5/23/2016,10:48:00,22.200014,106.742541
5/23/2016,10:48:30,22.095412,106.880707
5/23/2016,10:49:00,21.990887,107.019905
5/23/2016,10:49:30,21.886439,107.160149
5/23/2016,10:50:00,21.782070,107.301454
5/23/2016,10:50:30,21.677782,107.443833
5/23/2016,10:51:00,21.573575,107.587303
5/23/2016,10:51:30,21.469451,107.731879
5/23/2016,10:52:00,21.365412,107.877575
5/23/2016,10:52:30,21.261457,108.024407
5/23/2016,10:53:00,21.157590,108.172393
5/23/2016,10:53:30,21.053811,108.321547
5/23/2016,10:54:00,20.950121,108.471886
5/23/2016,10:54:30,20.846522,108.623427
5/23/2016,10:55:00,20.743016,108.776188
5/23/2016,10:55:30,20.639604,108.930185
5/23/2016,10:56:00,20.536288,109.085437
5/23/2016,10:56:30,20.433068,109.241961
5/23/2016,10:57:00,20.329947,109.399776
5/23/2016,10:57:30,20.226926,109.558900
5/23/2016,10:58:00,20.124007,109.719352
5/23/2016,10:58:30,20.021192,109.881153
5/23/2016,10:59:00,19.918482,110.044320
5/23/2016,10:59:30,19.815879,110.208875
5/23/2016,11:00:00,19.713384,110.374838
5/23/2016,11:00:30,19.611000,110.542229

5/23/2016,11:01:00,19.508729,110.711070
5/23/2016,11:01:30,19.406571,110.881382
5/23/2016,11:02:00,19.304530,111.053187
5/23/2016,11:02:30,19.202607,111.226507
5/23/2016,11:03:00,19.100803,111.401365
5/23/2016,11:03:30,18.999122,111.577783
5/23/2016,11:04:00,18.897565,111.755786
5/23/2016,11:04:30,18.796134,111.935397
5/23/2016,11:05:00,18.694831,112.116640
5/23/2016,11:05:30,18.593659,112.299541
5/23/2016,11:06:00,18.492620,112.484124
5/23/2016,11:06:30,18.391716,112.670415
5/23/2016,11:07:00,18.290949,112.858439
5/23/2016,11:07:30,18.190322,113.048225
5/23/2016,11:08:00,18.089837,113.239798
5/23/2016,11:08:30,17.989497,113.433187
5/23/2016,11:09:00,17.889304,113.628419
5/23/2016,11:09:30,17.789260,113.825522
5/23/2016,11:10:00,17.689369,114.024527
5/23/2016,11:10:30,17.589633,114.225461
5/23/2016,11:11:00,17.490055,114.428357
5/23/2016,11:11:30,17.390638,114.633244
5/23/2016,11:12:00,17.291384,114.840153
5/23/2016,11:12:30,17.192296,115.049116
5/23/2016,11:13:00,17.093378,115.260166
5/23/2016,11:13:30,16.994632,115.473336
5/23/2016,11:14:00,16.896061,115.688658
5/23/2016,11:14:30,16.797670,115.906168
5/23/2016,11:15:00,16.699460,116.125899
5/23/2016,11:15:30,16.601435,116.347888
5/23/2016,11:16:00,16.503600,116.572170
5/23/2016,11:16:30,16.405956,116.798782
5/23/2016,11:17:00,16.308507,117.027762
5/23/2016,11:17:30,16.211259,117.259147
5/23/2016,11:18:00,16.114213,117.492975
5/23/2016,11:18:30,16.017373,117.729287
5/23/2016,11:19:00,15.920745,117.968122
5/23/2016,11:19:30,15.824330,118.209521
5/23/2016,11:20:00,15.728135,118.453525
5/23/2016,11:20:30,15.632162,118.700177
5/23/2016,11:21:00,15.536416,118.949519
5/23/2016,11:21:30,15.440901,119.201596
5/23/2016,11:22:00,15.345622,119.456451
5/23/2016,11:22:30,15.250582,119.714130
5/23/2016,11:23:00,15.155788,119.974678
5/23/2016,11:23:30,15.061243,120.238143
5/23/2016,11:24:00,14.966952,120.504572
5/23/2016,11:24:30,14.872920,120.774013
5/23/2016,11:25:00,14.779152,121.046516
5/23/2016,11:25:30,14.685653,121.322130
5/23/2016,11:26:00,14.592429,121.600905
5/23/2016,11:26:30,14.499485,121.882895
5/23/2016,11:27:00,14.406827,122.168150
5/23/2016,11:27:30,14.314459,122.456724
5/23/2016,11:28:00,14.222388,122.748672
5/23/2016,11:28:30,14.130620,123.044049
5/23/2016,11:29:00,14.039161,123.342908
5/23/2016,11:29:30,13.948016,123.645309
5/23/2016,11:30:00,13.857192,123.951307
5/23/2016,11:30:30,13.766696,124.260961
5/23/2016,11:31:00,13.676535,124.574331
5/23/2016,11:31:30,13.586714,124.891476

5/23/2016,11:32:00,13.497240,125.212457
5/23/2016,11:32:30,13.408122,125.537335
5/23/2016,11:33:00,13.319365,125.866173
5/23/2016,11:33:30,13.230978,126.199035
5/23/2016,11:34:00,13.142968,126.535984
5/23/2016,11:34:30,13.055342,126.877085
5/23/2016,11:35:00,12.968109,127.222403
5/23/2016,11:35:30,12.881277,127.572005
5/23/2016,11:36:00,12.794853,127.925958
5/23/2016,11:36:30,12.708846,128.284330
5/23/2016,11:37:00,12.623265,128.647189
5/23/2016,11:37:30,12.538118,129.014603
5/23/2016,11:38:00,12.453415,129.386644
5/23/2016,11:38:30,12.369164,129.763380
5/23/2016,11:39:00,12.285376,130.144883
5/23/2016,11:39:30,12.202059,130.531224
5/23/2016,11:40:00,12.119224,130.922475
5/23/2016,11:40:30,12.036881,131.318707
5/23/2016,11:41:00,11.955039,131.719994
5/23/2016,11:41:30,11.873709,132.126407
5/23/2016,11:42:00,11.792902,132.538021
5/23/2016,11:42:30,11.712629,132.954908
5/23/2016,11:43:00,11.632900,133.377141
5/23/2016,11:43:30,11.553728,133.804795
5/23/2016,11:44:00,11.475124,134.237940
5/23/2016,11:44:30,11.397099,134.676652
5/23/2016,11:45:00,11.319665,135.121002
5/23/2016,11:45:30,11.242836,135.571063
5/23/2016,11:46:00,11.166623,136.026906
5/23/2016,11:46:30,11.091039,136.488604
5/23/2016,11:47:00,11.016098,136.956226
5/23/2016,11:47:30,10.941812,137.429842
5/23/2016,11:48:00,10.868195,137.909521
5/23/2016,11:48:30,10.795261,138.395331
5/23/2016,11:49:00,10.723023,138.887337
5/23/2016,11:49:30,10.651497,139.385605
5/23/2016,11:50:00,10.580695,139.890198
5/23/2016,11:50:30,10.510635,140.401177
5/23/2016,11:51:00,10.441329,140.918602
5/23/2016,11:51:30,10.372793,141.442530
5/23/2016,11:52:00,10.305044,141.973015
5/23/2016,11:52:30,10.238095,142.510112
5/23/2016,11:53:00,10.171964,143.053868
5/23/2016,11:53:30,10.106667,143.604330
5/23/2016,11:54:00,10.042219,144.161543
5/23/2016,11:54:30,9.978637,144.725545
5/23/2016,11:55:00,9.915939,145.296372
5/23/2016,11:55:30,9.854140,145.874058
5/23/2016,11:56:00,9.793258,146.458630
5/23/2016,11:56:30,9.733310,147.050111
5/23/2016,11:57:00,9.674314,147.648519

5/23/2016,11:57:30,9.616287,148.253870
5/23/2016,11:58:00,9.559247,148.866170
5/23/2016,11:58:30,9.503212,149.485423
5/23/2016,11:59:00,9.448199,150.111625
5/23/2016,11:59:30,9.394227,150.744767
5/23/2016,12:00:00,9.341313,151.384834
5/23/2016,12:00:30,9.289477,152.031803
5/23/2016,12:01:00,9.238735,152.685645
5/23/2016,12:01:30,9.189107,153.346323
5/23/2016,12:02:00,9.140609,154.013795
5/23/2016,12:02:30,9.093262,154.688006
5/23/2016,12:03:00,9.047082,155.368899
5/23/2016,12:03:30,9.002088,156.056404
5/23/2016,12:04:00,8.958297,156.750446
5/23/2016,12:04:30,8.915727,157.450941
5/23/2016,12:05:00,8.874396,158.157794
5/23/2016,12:05:30,8.834322,158.870903
5/23/2016,12:06:00,8.795521,159.590156
5/23/2016,12:06:30,8.758011,160.315433
5/23/2016,12:07:00,8.721807,161.046604
5/23/2016,12:07:30,8.686927,161.783530
5/23/2016,12:08:00,8.653387,162.526061
5/23/2016,12:08:30,8.621202,163.274041
5/23/2016,12:09:00,8.590388,164.027301
5/23/2016,12:09:30,8.560958,164.785665
5/23/2016,12:10:00,8.532929,165.548948
5/23/2016,12:10:30,8.506312,166.316955
5/23/2016,12:11:00,8.481123,167.089483
5/23/2016,12:11:30,8.457373,167.866320
5/23/2016,12:12:00,8.435075,168.647245
5/23/2016,12:12:30,8.414241,169.432030
5/23/2016,12:13:00,8.394880,170.220439
5/23/2016,12:13:30,8.377005,171.012229
5/23/2016,12:14:00,8.360623,171.807148
5/23/2016,12:14:30,8.345744,172.604940
5/23/2016,12:15:00,8.332376,173.405342
5/23/2016,12:15:30,8.320526,174.208085
5/23/2016,12:16:00,8.310200,175.012895
5/23/2016,12:16:30,8.301405,175.819495
5/23/2016,12:17:00,8.294146,176.627601
5/23/2016,12:17:30,8.288425,177.436929
5/23/2016,12:18:00,8.284248,178.247191
5/23/2016,12:18:30,8.281614,179.058096
5/23/2016,12:19:00,8.280528,179.869352
5/23/2016,12:19:30,8.280988,180.680667
5/23/2016,12:20:00,8.282995,181.491748
5/23/2016,12:20:30,8.286547,182.302304
5/23/2016,12:21:00,8.291643,183.112043
5/23/2016,12:21:30,8.298279,183.920676
5/23/2016,12:22:00,8.306453,184.727917