



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

UNIVERSIDAD DE FUERZAS ARMADAS – ESPE

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO EN MECATRÓNICA**

REALIZADO POR:

CARLOS EDUARDO BARRIONUEVO SÁNCHEZ

PAÚL SANTIAGO TUMBACO CASA

**“AUTOMATIZACIÓN DE UN SISTEMA DE FOTOHIDROCONVERSIÓN DE
RADIACIÓN SOLAR PARA MEJORAR SU EFICIENCIA EN EL
TRATAMIENTO TÉRMICO DE MATERIALES”**

DIRECTOR: ING. JOSÉ GUASUMBA

CODIRECTOR: ING. FERNANDO OLMEDO

Sangolquí, Diciembre 16 de 2014

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto de grado denominado “**AUTOMATIZACIÓN DE UN SISTEMA DE FOTOHIDROCONVERSIÓN DE RADIACIÓN SOLAR, PARA MEJORAR SU EFICIENCIA EN EL TRATAMIENTO TÉRMICO DE MATERIALES**”, fue realizado en su totalidad por Carlos Eduardo Barrionuevo Sánchez y Paúl Santiago Tumbaco Casa, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniera en Mecatrónica.

Ing. José Guasumba

DIRECTOR

Ing. Fernando Olmedo

CODIRECTOR

AUTORIZACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, Carlos Eduardo Barrionuevo Sánchez y Paúl Santiago Tumbaco Casa

DECLARAMOS QUE:

El proyecto de grado denominado “AUTOMATIZACIÓN DE UN SISTEMA DE FOTOHIDROCONVERSIÓN DE RADIACIÓN SOLAR PARA MEJORAR SU EFICIENCIA EN EL TRATAMIENTO TÉRMICO DE MATERIALES” ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan el pie de las paginas correspondientes, cuyas fuentes se encuentran en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de nuestra autoría.

En virtud de esta declaración, nos responsabilizamos del contenido, veracidad y alcance del proyecto de grado en mención.

Carlos Eduardo Barrionuevo Sánchez

Paúl Santiago Tumbaco Casa

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA.

Director de la Carrera de Ingeniería Mecatrónica.

Ing. Francisco Terneus

Sangolquí, 16 de Diciembre 2014

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORIZACIÓN

Nosotros, Carlos Eduardo Barrionuevo Sánchez y Paúl Santiago Tumbaco Casa

Autorizamos a la Escuela Politécnica del Ejército la publicación, en la biblioteca virtual de la institución del proyecto de grado titulado: “AUTOMATIZACIÓN DE UN SISTEMA DE FOTOHIDROCONVERSIÓN DE RADIACIÓN SOLAR PARA MEJORAR SU EFICIENCIA EN EL TRATAMIENTO TÉRMICO DE MATERIALES”, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Carlos Eduardo Barrionuevo Sánchez

Paúl Santiago Tumbaco Casa

Sangolquí, 16 de Diciembre 2014

DEDICATORIA

El proyecto que se presenta a continuación está dedicado a mi familia, mi madre Lucrecia que con su amor y su apoyo en los momentos difíciles me permitieron continuar y no decaer, a mi padre Sergio que con sus consejos y su ejemplo de vida me han motivado y han marcado como debe de ser la mía, a mi hermano David que es la motivación para ser mejor y convertirme en un ejemplo a seguir y eso es en lo que me quiero convertir para él.

Dedico este trabajo también a ti Evelyn que desde el cielo sé que siempre has estado conmigo espiritualmente y sé que siempre estarás como una guía en mi camino para apoyarme y darme fuerzas para seguir adelante.

PAÚL SANTIAGO TUMBACO CASA

DEDICATORIA

A mi madre, por su amor y sacrificio constantes que me han permitido llegar tan lejos y que con sus palabras y ejemplo siempre me ha sabido guiar en cada paso de mi vida

A mis abuelitos Jose Luis, Angélica y Carlos que desde el cielo cuidan siempre de mí y de mi familia y a mi Abuelita Carmen que cuida de toda nuestra familia y nos acompaña.

A mi padre y a mi hermana siempre he podido contar con su ayuda y su amor, aún en los momentos más difíciles.

A mi novia Marcela, por ser el motor que me ha impulsado a lo largo de este tiempo y no me ha dejado desfallecer ni por un momento.

CARLOS EDUARDO BARRIONUEVO SÁNCHEZ

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darme la salud, inteligencia y la oportunidad de existir y permitirme realizar los proyectos que tiene preparados para mí, por darme la fuerza y esperanza en los momentos más difíciles.

A mis padres Sergio y Lucrecia que sin su apoyo este sueño que comenzó hace muchos años no se hubiese podido convertir e realidad.

A mis hermanos David y Evelyn que se convirtieron en un pilar para mi vida, Evelyn, un ejemplo de lo que es realmente importante en la vida y como debo vivirla y David que debo realizar lo correcto para ser un buen ejemplo para ti siempre.

A mi Novia Katty que se convirtió en un pilar fundamental en mi vida que estuvo en los momentos que más lo necesitaba siendo una mano amiga y sus oídos que escuchan cuando era necesario.

PAÚL SANTIAGO TUMBACO CASA

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por todas las bendiciones que recibo a diario, como la de contar con salud, y contar con mi familia y mis amigos a mi lado.

A mi madre por su ejemplo de cómo ser una mejor persona y por todo lo que ha hecho, por mí y por mi hermana, porque siempre he sentido el amor que nos tiene, reflejado en cada una de sus acciones.

A mi hermana Estefanía por ser una amiga más con la que puedo contar, y que ha sabido mostrarme mis errores y corregirlos con amor.

A mi padre Carlos por su preocupación y su apoyo constante.

A mis amigos del colegio Alfonso y Andrés que son como hermanos para mí muchas gracias por su compañía, consejos y ayuda, que me ha permitido siempre seguir adelante.

A mis amigos y amigas de la universidad, Paul, Felix, Jorge, Marcelo, David, Luis, Cristian, Santiago y Jhoana por ser amigos de verdad con quienes siempre he podido contar.

A mis directores y codirectores por el compromiso y conocimiento profesional que nos brindaron.

A mi novia Marcela por todo el amor brindado, por todas las cosas que compartimos, por estar a mi lado durante este tiempo de manera constante, y por ayudarme a tener sueños mucho mayores en mi vida.

CARLOS EDUARDO BARRIONUEVO SÁNCHEZ

Tabla de contenido

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO	ii
LEGALIZACION DEL PROYECTO	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>
AUTORIZACIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTOS	vii
RESUMEN	xiii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. ANTECEDENTES	1
1.1.1. Energía Solar en el Ecuador	1
1.2. JUSTIFICACIÓN	4
1.3. ALCANCE DEL PROYECTO	6
1.4. OBJETIVOS	6
1.4.1. Objetivo general	6
1.4.2. Objetivos específicos	7
1.5. METODOLOGÍA	7
2. MARCO TEÓRICO	9
2.1. LA ENERGÍA SOLAR	9
2.1.1. La Radiación solar Terrestre	9
2.1.2. Influencia del Espectro de radiación solar	11
2.1.3. Posicionamiento del Sol	13
2.1.4. Radiación solar en el Ecuador	16
2.1.5. Cálculo de la radiación solar local	18
2.2. SISTEMAS FOTO TÉRMICOS CONCENTRADORES	22
2.2.1. Definiciones	22
2.2.2. Tipos de sistemas foto térmicos concentradores	23
2.3. FUNDAMENTOS MATEMÁTICOS	24
2.3.1. Parábola	24

2.3.2.	Paraboloide de Revolución	25
2.3.3.	Paraboloide como concentrador	31
2.3.4.	Teoría de Antenas	32
2.3.5.	Definiciones en la parábola	32
2.3.6.	Relación entre el Foco y el Diámetro del Paraboloide f/d	33
2.3.7.	Lentes	35
2.4.	TRANSFERENCIA DE CALOR	43
2.4.1.	Elementos de un sistema de fotohidroconversion.	44
3.	DISEÑO MECÁNICO	45
3.1.	DISEÑO DEL CONCENTRADOR SOLAR	45
3.1.1.	Geometría	46
3.1.2.	Aislamiento	47
3.1.2.1.	Numero de Pernos	47
3.1.2.2.	Tipos de arandelas	48
3.1.3.	Tipo de empaque	49
3.2.	ESTRUCTURA DE DISEÑO PARA EL CONCENTRADOR	49
3.2.1.	Estructura de Sujeción	50
3.2.2.	Geometría	50
3.2.3.	Eje de Rotación	58
3.2.4.	Acople Eje-Octógono	58
3.2.5.	Diseño del Eje Interior	60
3.2.6.	Selección de Rodamientos	64
3.2.7.	Diseño del Eje Exterior	67
3.2.8.	Octógono Exterior	67
3.2.9.	Eje Exterior	69
3.3.	MOVIMIENTO	70
3.3.1.	Alternativas	71
3.3.2.	Matriz de Decisión	75
3.3.3.	Selección de Motores	78
3.3.3.1	Cálculo de Velocidad	78
3.3.4.	Cálculo de Potencia	80

3.3.5.	Diseño caja reductora	88
3.4.	ESTRUCTURA DE SOPORTE DEL CONCENTRADOR	94
3.4.1.	Estructura previa	94
3.4.2.	Geometría de la estructura	96
3.4.3.	Simulación CAD	99
3.4.4.	Diseño Final	101
3.5.	ABSORBEDOR	103
<i>4.</i>	<i>DISEÑO ELÉCTRICO - ELECTRÓNICO</i>	<i>106</i>
4.1.	CONTROL DE MOTORES	106
4.1.1.	Puente H	110
4.1.2.	Diseño del Puente H	111
4.2.	SELECCIÓN DE SENSORES	115
4.2.1.	Sensores de Luz	115
4.2.1.1.	LDR	116
4.2.1.2.	Acondicionamiento LDR	117
4.2.2.	Sensores de Radiación	121
4.2.2.1.	Acondicionamiento Sensores de Radiación	122
4.2.3.	Sensores de Temperatura	123
4.2.3.1.	Sensor de Temperatura en el Foco	123
4.2.3.2.	Sensor de Temperatura Ambiente	126
4.2.3.3.	Sensor de Temperatura en el Concentrador	129
4.3.	ELEMENTOS DE CONTROL	131
4.3.1.	Arduino	132
4.3.1.1.	Arduino Mega	133
4.3.2.	Sistemas de Comunicación	137
4.3.2.1.	Comunicación Serial	138
4.3.2.2.	Comunicación Bluetooth	140
4.3.3.	Método de Control	141
4.3.4.	Seguimiento Solar	142
4.3.5.	Programa de Control	144

4.3.6. Programas Adicionales _____	147
4.3.7. Programas Android _____	147
4.3.7.1. App Inventor _____	148
4.3.8. Visual Studio _____	150
4.3.9. Visualización de datos _____	156
4.3.9.1. Visualización en LCD _____	157
4.3.10. Visualización Aplicación _____	159
4.3.11. CIRCUITO FINAL _____	161
5. PRUEBAS Y RESULTADOS _____	170
5.1. OPERACIÓN Y FUNCIONAMIENTO _____	170
5.1.1. Consideraciones Iniciales _____	171
5.1.2. Pruebas Seguimiento Manual _____	177
5.1.3. Pruebas Seguimiento Automático _____	180
5.1.4. Análisis de Resultados _____	181
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES _____	184
6.1 CONCLUSIONES _____	184
6.2 RECOMENDACIONES _____	186
7. Bibliografía _____	188

Índice de Figuras

Fig. 1. Gráfica de la Insolación Difusa Promedio en el Ecuador	2
Fig. 2. Insolación Directa promedio en el Ecuador.....	3
Fig. 3. Comparación entre un sistema motorizado y un sistema móvil	5
Fig. 4. Energía que ingresa a la tierra promedio Tera vatios – año.	10
Fig. 5. Espectro electromagnético.....	12
Fig. 6. Coordenadas de posición de un punto terrestre	13
Fig. 7. Variación del ángulo de declinación a lo largo del año	14
Fig. 8. Posición del sol con respecto a una superficie inclinada.	16
Fig. 9. Mapa de Insolación Global del Ecuador.....	17
Fig. 10 Distintos tipos de colectores solares concentradores	23
Fig. 11. Grafica formación de la parábola	24
Fig. 12. Paraboloide de revolución elaborada en Matlab	25
Fig. 13. Intersección de la parábola con un plano vertical y uno horizontal ...	26
Fig. 14. Circunferencia que muestra límites de integración	29
Fig. 15. Concentrador tipo paraboloide.....	32
Fig. 16. Parábola que se abre alrededor del eje x	32
Fig. 17. Figura de parábola que muestra la relación f/D	34
Fig. 18. Fuente de reflectores para diferentes diámetros.....	35
Fig. 19. Medios que atraviesa la luz para el cálculo del índice de refracción. 37	
Fig. 20. Lente Grueso Convergente	37
Fig. 21. Lente Grueso Divergente	38
Fig. 22. Convención de signos cartesianos.....	38
Fig. 23. Grafica para encontrar el radio de curvatura.....	40
Fig. 24. Lente plano – convexa.	43
Fig. 25. Vista superior (Tapa) del concentrador	46
Fig. 26. Vista lateral rotada del concentrador.....	46

Fig. 27 Simulación de un empaque de duralón.....	48
Fig. 28 Simulación de la forma del empaque	49
Fig. 29. Estructura sujeta por 2 anillos planos	50
Fig. 30. Peso estructura anillo plano.....	51
Fig. 31. Estructura sujeta por 2 prismas cuadrados.....	52
Fig. 32. Estructura sujeta por 2 prismas hexagonales	53
Fig. 33. Estructura sujeta por 2 prismas octogonales.	53
Fig. 34. Catálogo Tubo Estructural Rectangular. Catálogo de Acero.....	54
Fig. 35. Sección Tubo cuadrado acero galvanizado	55
Fig. 36. Simulación Octógono SW.	55
Fig. 37. Simulación SW. Concentrador	56
Fig. 38. Análisis Estático de Esfuerzos en Estructura.....	56
Fig. 39. Análisis Estático de Deflexión en Estructura.....	57
Fig. 40. Medida Promedio Brazo Octógono	57
Fig. 41. Esquema Placa de Acople	59
Fig. 42. Diseño Geométrico	60
Fig. 43. Diagrama de Cuerpo Libre Eje.....	60
Fig. 44. Tabla A-20. Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley.....	62
Fig. 45. Bearing Units with Ductile Cast Iron Housing.....	66
Fig. 46. Sección Tubo cuadrado acero galvanizado	67
Fig. 47. Simulación Concentrador con Sujeción.	68
Fig. 48. Análisis Estático Octógono Exterior.	68
Fig. 49. Diagrama de Cuerpo Libre Eje.....	69
Fig. 50. Estudio de Movimiento Eje Secundario.....	81
Fig. 51. Gráfico de Torque desarrollado.....	81
Fig. 52. Esquema Viento sobre Área Convexa	83
Fig. 53. Esquema Viento sobre Área Plana	83
Fig. 54. Estudio de Movimiento Eje Primario	85

Fig. 55. Gráfico de Torque desarrollado.....	86
Fig. 56. Estructura anterior.....	94
Fig. 57. Volante de giro	95
Fig. 58. Cabo de ayuda para soportar el peso	95
Fig. 59. Inercia del concentrador por Software CAD, CAE comercial	96
Fig. 60. Soportes verticales del concentrador	98
Fig. 61. Simulación CAD de soporte a esfuerzos en SW	99
Fig. 62. Deformacion de los soportes	100
Fig. 63. Estructura de soporte final	101
Fig. 64. Modelo de gradas	102
Fig. 65. Modelo final del soporte y las gradas.....	102
Fig. 66 Catálogo Ángulos ADELCA	103
Fig. 67 Esquema Absorvedor.....	104
Fig. 68 Circuito de Disparo de un TRIAC.....	107
Fig. 69 Circuito Inversor de Voltaje	108
Fig. 70 Circuito Puente H de control de motor	109
Fig. 71 Circuito Puente H mediante Transistores MOSFET.....	113
Fig. 72 Sensores Fotoeléctricos.....	115
Fig. 73 LDR.....	117
Fig. 74 Esquema Divisor de Voltaje	118
Fig. 75 Voltaje de Salida Prueba Divisor de Voltaje.....	120
Fig. 76 Piranómetro Vantage Pro 2.....	121
Fig. 77 Ángulo de Incidencia.....	122
Fig. 78. Conversión de datos y lectura del piránometro	123
Fig. 79 Imagen de un sensor One wire Water proof	129
Fig. 80 Ejemplo Conexión Arduino.....	130
Fig. 81 Conexión de la resistencia para obtener la salida al arduino	131
Fig. 82 Diagrama de flujo basico para el control	131

Fig. 83 Selección del arduino a utilizar	132
Fig. 84 Ejemplo de arduino Mega	133
Fig. 85 Pines ATmega 2560.....	137
Fig. 86 Ejemplo de un conector BD9 para comunicación serial	139
Fig. 87 Comunicación serial mediante el arduino	139
Fig. 88 Diferentes alcances de dispositivos Bluetooth	140
Fig. 89 Dispositivo bluetooth para microcontroladores	141
Fig. 90 Ejemplo de conexión de un bluetooth para arduino	141
Fig. 91 Esquema de Funcionamiento Seguidor Solar.....	143
Fig. 92 Símbolo Internacional de Android	147
Fig. 93 Pilares Fundamentales App Inventor	148
Fig. 94 Ingreso a la cuenta de google	149
Fig. 95 Página de diseño de páginas de aplicación	149
Fig. 96 Pantalla de Programación.....	150
Fig. 97 Ventana de Inicio	151
Fig. 98 Pantalla de Conexión	152
Fig. 99 Ventana De Mensaje.....	152
Fig. 100 Ventana De Error	152
Fig. 101 Ventana De Conexión con Lista de Puertos Disponibles	153
Fig. 102 Ventana De Control.....	153
Fig. 103 Libro Excel de Almacenamiento de Datos	154
Fig. 104 Esquema de Conexión Pantalla LCD.....	158
Fig. 105 Pantalla de Visualización	159
Fig. 106 Pantalla de inicio de la aplicación	159
Fig. 107 Pantalla de Control.....	160
Fig. 108 Esquema Isis Conexión de Alimentación	162
Fig. 109 Esquema Isis Conexión de Alimentación Placa Arduino.....	162
Fig. 110 Esquema Isis Puente H.....	163

Fig. 111 Esquema Isis Diodos Antiretorno.....	163
Fig. 112 Esquema Isis Puertos ADC.....	164
Fig. 113 Esquema Isis Salidas del Arduino.....	165
Fig. 114 Esquema Isis Sensores One-Wire	165
Fig. 115 Esquema Isis Energía LCD	166
Fig. 116 Esquema Isis Módulo Bluetooth.....	166
Fig. 117 Esquema Isis Total.....	167
Fig. 118 Circuito Placa Total Ares.....	168
Fig. 119 Circuito Placa Total Simulado	168
Fig. 120 Circuito Placa Barnizada.....	169
Fig. 121 Circuito Finalizado.....	169
Fig. 122 Equipo de prueba.....	170
Fig. 123 Gráfica Temperatura en el Foco	177
Fig. 124 Gráfica Temperatura en el Foco Y Radiación Medida	178
Fig. 125 Gráfica Radiación Y Temperatura Ambiente.....	179
Fig. 126 Gráfica Temperatura en el Foco.	180
Fig. 127. Gráfica Radiación Medida Y Temperatura en el Foco.	180
Fig. 128 Visualización Datos.....	181
Fig. 129 Gráfica Temperatura Ambiente Promedio.....	182
Fig. 130 Gráfica Radiación Medida Promedio.....	182

Índice de Tablas

Tabla 1. Coeficientes climáticos a y b para el Ecuador.....	19
Tabla 2. Tabla de comparación entre materiales	39
Tabla 3. Tabla para obtención del radio de curvatura	41
Tabla 4. Tabla de comparación de potencias de las lentes.	42
Tabla 5. Tabla de comparación entre volumen peso y área de las lentes. ...	42
Tabla 6. Criterios a Evaluar en la selección.....	77
Tabla 7. Matriz Morfológica.....	77
Tabla 8. Características del motor eje primario.....	88
Tabla 9. Tabla de Irreversibilidad en función del ángulo de hélice.....	89
Tabla 10. Resumen Características.....	91
Tabla 11. Características Motoreductor.	92
Tabla 12. Características Caja Reductora Eje Secundario	93
Tabla 13. Características Transistor Mosfet IRFZ44.....	112
Tabla 14. Características Transistor Mosfet IRF9540N.	113
Tabla 15 Divisor de Voltaje Prueba.....	119
Tabla 16. DS18B20 AJUSTE DE COMANDOS.....	128
Tabla 17. Pines Pantalla LCD.	158
Tabla 18. Datos Tomados el día 12 Noviembre de 2014.....	172
Tabla 19. Datos Tomados el día 17 de Noviembre de 2014.....	173
Tabla 20. Datos Tomados el día 19 de Noviembre de 2014.....	174
Tabla 21. Datos Tomados el día 21 de Noviembre de 2014.....	174
Tabla 22. Datos Tomados el día 24 de Noviembre de 2014.....	176

RESUMEN

El proyecto que se presenta a continuación denominado “Automatización de un Sistema de Fotohidroconversión de Radiación Solar para Mejorar su Eficiencia en el Tratamiento Térmico de Materiales” comprende el diseño e implementación de un concentrador parabólico de radiación solar de un metro de diámetro, construido de acrílico, el cual es capaz de concentrar radiación a una distancia de 3.3 metros, alcanzando temperaturas registradas de 380° centígrados. Se diseñó una estructura de sujeción y movimiento sobre la cual puede girar el concentrador con dos grados de libertad, mediante motoredutores acoplados a dos ejes de rotación. Para dicha estructura se diseñó una estructura de soporte capaz de soportar el peso de los elementos antes descritos. Este proyecto permite mejorar la eficiencia al emplear un sistema de seguimiento solar automático basado en la perpendicularidad de los rayos solares que inciden en el concentrador y en sensores de luz solar ubicados paralelamente al concentrador. Cuenta también con sensores de temperatura y radiación global que se conectan a un microprocesador el cual realiza el acondicionamiento de la señal para que sea entendible, y pueda ser presentada en una pantalla LCD. Finalmente el equipo procesa los datos, y después los envía, mediante comunicación bluetooth, a un computador que recibe la información, los almacena ordenadamente en una hoja de datos electrónica y los filtra para poder realizar gráficas de control. También permite que los datos enviados sean visualizados en un equipo celular en tiempo real y tenga la posibilidad de controlar el movimiento del equipo desde el mismo.

Palabras Clave: **FOTOHIDROCONVERSIÓN, RADIACIÓN SOLAR, SEGUIMIENTO SOLAR, COMUNICACIÓN BLUETOOTH, APP INVENTOR.**

ABSTRACT

The project presented below entitled "Automation System of Solar Radiation Fotohidroconversión to Improve Efficiency Heat Treatment of Materials" includes the design and implementation of a parabolic concentrator of solar radiation from one meter in diameter, constructed of acrylic which is able to concentrate radiation at a distance of 3.3 meters, reaching temperatures of 380 ° C recorded. A holding and movement structure, which can rotate the hub with two degrees of freedom, using motors coupled to two axes of rotation. It also was design a support structure capable of supporting the weight of the elements described above. This project will improve efficiency by employing an automatic tracking solar system, based on perpendicularity of the solar rays incident on the hub and daylight sensors located parallel to the hub. It also has temperature sensors and global radiation that are connected to a microprocessor which performs signal conditioning to make it understandable and can be presented on a LCD screen. Finally the computer processes the data, and then sends them through bluetooth communication, to a computer that receives the information, stores neatly on a electronic sheet and filters to perform control charts. It also allows data received will be displayed on a mobile device in real time and has the ability to control the movement of equipment from it.

Key words: **FOTOHIDROCONVERSION, SOLAR RADIATION, TRACKING SOLAR, BLUETOOTH COMUNICACION, APP INVENTOR.**

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

La tecnología se desarrolla a partir de la motivación para generar una alternativa ecológica y de eficiencia energética mediante el uso de energías renovables. En este sentido la aplicación de esta tecnología permite tanto reducir el consumo de energías no renovables como la fósil y nuclear, como también amortiguar el daño ambiental causado por las mismas, y mediante su aplicación resolver diferentes problemas o necesidades que se presentan en la industria.

El presente proyecto busca aprovechar la energía solar como un medio factible para reemplazar métodos de calentamiento basados en otros tipos de energía.

1.1.1. Energía Solar en el Ecuador

Una característica destacable debido a la latitud del Ecuador, es que recibe 12 horas de luz solar, lo cual se explica con exactitud en un reportaje del Diario Hoy. Desde hace ocho años el investigador ecuatoriano Christian Endara ha estudiado la dinámica de los invernaderos. Eso le ha llevado a realizar investigaciones sobre las condiciones meteorológicas del país con el

apoyo de la Escuela Politécnica del Ejército (ESPE). De esta serie de análisis Endara llegó a la conclusión de que debido a la posición geográfica del país, la producción de energía solar podría convertirse en una realidad.

"La medida para determinar la luminosidad es el lux, en condiciones regulares se necesita 40 luxes para iluminar un lugar, en un día soleado en Quito encontramos cerca de 100 mil luxes, lo cual lleva a la necesidad de desarrollar políticas que permitan aprovechar las condiciones privilegiadas del país" (DiarioHoy, 2011)

La medida de cantidad de energía solar que llega a la superficie medida en $\frac{wh}{m^2}$ se denomina insolación, esta es una medida fundamental para la generación de cualquier otra energía a partir de la radiación solar, la insolación que llega a la superficie puede ser de dos tipos, puede ser insolación difusa e insolación directa. A continuación se presenta un mapa referente a la Insolación Difusa en el Ecuador Ver figura 1.

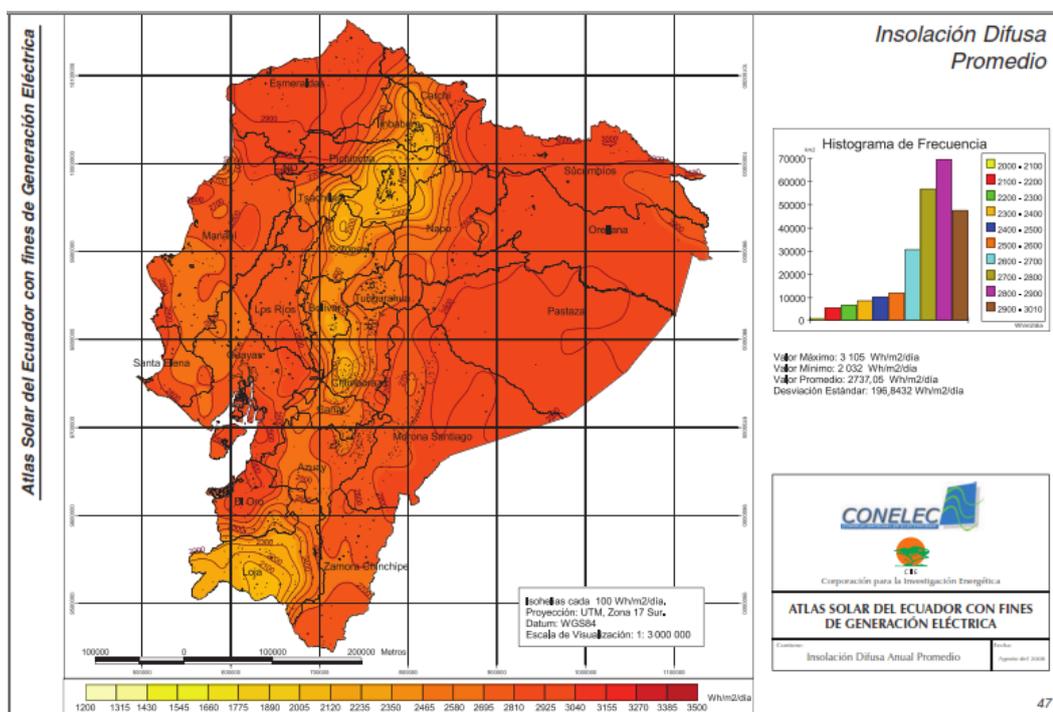


Fig. 1. Gráfica de la Insolación Difusa Promedio en el Ecuador

1.2. JUSTIFICACIÓN

A lo largo de los últimos años la tecnología ha avanzado a pasos agigantados en muchos ámbitos, lo que ha sido posible mediante la utilización de grandes cantidades de energía, por lo que su consumo también ha alcanzado niveles nunca antes contemplados. Esta energía ha sido principalmente de tipo fósil y nuclear, la cual ha generado conflictos, es limitada y ha traído consecuencias ambientales desastrosas en algunos casos.

Es por tal motivo que surge la necesidad de generar fuentes de energía limpia, que aprovechen mejor los recursos disponibles y garanticen su disponibilidad para las futuras generaciones. Estas alternativas energéticas son: Energía solar, Hidráulica, Eólica, Biomasa, Geotérmica, entre otras. Sin embargo muchas de ellas dependerán en gran parte de la geografía de cierta región, a diferencia de la energía solar, la cual está a la disposición de todos independientemente de sus condiciones geográficas.

“El aprovechamiento de la energía solar, como fuente de energía útil tiene un doble objetivo: por un lado ahorrar energía no renovable, sobre todo energía fósil y energía nuclear, y por otro lado amortiguar el impacto ambiental generado por ellas” (Lorenzo, 2006)

Sin embargo a pesar de las ventajas ambientales que posee, respecto a otro tipo de energías, esta ha tenido un uso bastante limitado a nivel mundial, debido a su baja eficiencia al compararla con formas de energía existentes. Es por este motivo que el desarrollo de tecnologías que permitan mejorar su eficiencia es un tema primordial a nivel mundial.

A continuación se muestra un ejemplo de cómo mejorar la eficiencia en recolección comparando un sistema automático con un sistema que ha sido solo arreglado. Ver figura 3

Eficiencia del panel motorizado: 160%



Fig. 3. Comparación entre un sistema motorizado y un sistema móvil

Actualmente la mayoría de granjas solares, paneles fotovoltaicos, y demás tecnologías en esta línea a nivel mundial, se encuentran fijas en su estructura con cierto grado de inclinación, lo cual no permite obtener la totalidad de energía proveniente del sol, debido a la reflexión de los rayos solares en su superficie, limitando de esta forma su capacidad energética.

Es entonces necesario el desarrollar un sistema de seguimiento solar, que permita un mejor aprovechamiento de los mismos, para mejorar tanto como sea posible su eficiencia final.

Si se considera la preocupación del país acerca de este tema en energía renovable y sus aplicaciones se puede revisar la página del Ministerio de Electricidad y energía renovable (MEER, 2013) “Esta Subsecretaría es la encargada de promover y proponer la implementación de políticas, estrategias, proyectos y acciones tendientes a desarrollar y aplicar planes de energía renovable y el uso eficiente de la misma, en todo el país.” Todo esto

con el fin de cambiar la matriz energética, aprovechando de manera eficiente los recursos.

El presente proyecto ayudara no solo al mejoramiento de un equipo del laboratorio de Energía y Mecánica sino también a impulsar el desarrollo de investigaciones en temas de uso eficiente de la energía renovable, la más común la energía solar y a poder utilizarla como una posible herramienta para pruebas y ensayos de materiales.

1.3. ALCANCE DEL PROYECTO

Realizar la optimización del sistema de fotohidroconversión para mejorar la captación de la radiación solar directa de manera que se obtenga un sistema con una estructura que permita soportar la lente y los sistemas que realizan el movimiento de tal forma que en una cámara de reacción se concentre la mayor cantidad de energía en forma de calor que sea posible, el diseño contempla un sistema de adquisición de datos de temperatura y radiación solar de manera que permita monitorear las el comportamiento de las variables dentro de la cámara de pruebas y con estos datos proporcionar la eficiencia que presenta el sistema.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general

Diseñar e implementar un sistema de fotohidroconversión que mediante el seguimiento solar con dos grados de libertad permita concentrar adecuadamente la luz en la cámara de reacción experimental donde se realizará el tratamiento superficial de los materiales.

1.4.2.Objetivos específicos

- Diseñar e implementar una estructura mecánica que permita el movimiento para alcanzar la mayor captación de radiación solar.
- Realizar el diseño eléctrico y electrónico que permita generar el movimiento de la estructura mecánica.
- Desarrollar un sistema de adquisición de datos que permita la recolección de variables de temperatura y radiación en la cámara al momento de realizar el tratamiento térmico y un sistema de visualización de los mismos.
- Analizar los datos obtenidos para determinar la eficiencia del sistema.

1.5. METODOLOGÍA

El proyecto utilizara la metodología científica que tendrá sus cuatro etapas que serán análisis, diseño, implementación y evaluación de resultados.

- **Análisis:** Se investigara la irradiación solar, relación de concentración y eficiencia en la concentración solar dentro de la cámara de reacción. Además se analizara y calculara la dimensión y características de elementos eléctricos como motor, pistón y mecanismos necesarios para el movimiento de estos se elegirá el más adecuado basados en peso, tamaño, costo y sus características mecánicas y eléctricas.
- **Diseño:** Se basa en la forma y funcionalidad del equipo para establecer un rediseño inicial de la estructura, la cual permitirá una visión amplia de todo el sistema. Los datos de pesos y esfuerzos se calcularan de acuerdo a un estudio estático y por simulación de elementos finitos. En cuanto a los motores y los pistones y demás elementos electrónicos serán los elementos definitorios después de los cálculos mecánicos.

- Implementación: Se construirá las nuevas partes de la estructura basados en el diseño, se implementara la lupa que se ha dimensionado y mandado a construir, además se implementara la cámara de reacción, también se construirá la placa electrónica, se programara el micro controlador para la interfaz y de control y manejo de datos.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1. LA ENERGÍA SOLAR

A lo largo de los años en el afán de encontrar energías alternativas que permitan reducir el impacto ambiental que otro tipo de energías han producido, se han desarrollado diversas aplicaciones en especial con la energía solar que es la más abundante teniendo en cuenta que siempre está allí. El sol por medio de la energía de radiación provee de vida a nuestro planeta y permite que todo lo que existe funcione de manera correcta.

2.1.1. La Radiación solar Terrestre

La radiación solar en el momento que penetra la atmosfera, presenta dos fenómenos el uno de absorción y el otro de dispersión, y estos a su vez dependerán de la masa , el espesor , densidad de la capa de aire atravesada y de su composición, **(Gonzalez, 2009)**.

Debido a las diferentes capas que posee la tierra, principalmente la capa de ozono, no permiten que toda la radiación producida por el sol llegue hasta la superficie, como se observa en la figura 4, lo cual es algo bueno ya que si

no esta sería gravemente afectada. La magnitud que mide la cantidad de radiación solar que llega a la tierra es la Irradiancia, cuya unidad de medida es el W/m^2 .

Esta energía electromagnética puede concentrarse para permitir su utilización, y de esta manera se han realizado múltiples aplicaciones como por ejemplo:

- Agua caliente sanitaria
- Calefacción y frío solar
- Aclimatación de piscinas
- Iluminación
- Bombeo y Riego
- Autoconsumo, especialmente en la industria automotriz
- Producción de energía para venta.
- Eficiencia energética, entre otras.

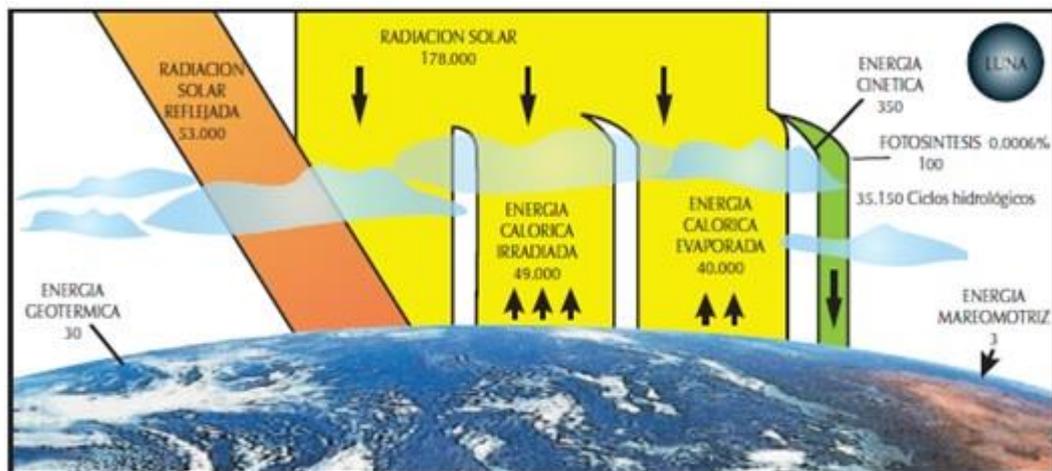


Fig. 4. Energía que ingresa a la tierra promedio Tera vatios – año.

También dentro de investigación se han realizado varios prototipos que permitan utilizar esta energía de algún modo un poco menos convencional, como calentar alimentos o evaporar agua para demostraciones.

El sistema que se diseñara y se construirá tiene como principal objetivo aumentar la eficiencia en la recolección de radiación solar por medio de un sistema de seguimiento que permitirá a una lupa solar que concentre la mayor cantidad de energía térmica en el foco inverso de la parábola y con una cámara ubicada en ese punto tomar los datos que permitan realizar experimentos para el laboratorio.

Para realizar la recolección de radiación solar primero se tomara en cuenta que la mayor cantidad de energía que llega al planeta es por medio de radiación solar electromagnética que se genera en el sol y que llega al exterior de nuestra atmosfera, esta cantidad de energía está definida como una cantidad fija igual a 1366 w/m², conocida también como constante solar, para encontrar su valor se utiliza la siguiente ecuación:

$$K = \sigma * T_{eff}^4 * \left(\frac{rs}{a0}\right)^2 = 1366 \frac{W}{m^2} \quad (2.1)$$

Dónde:

K constante solar; **σ** Constante de bolzmann (5,67 x 10⁻⁸ W/m² K⁴); **T_{eff}** Temperatura efectiva del sol (5776°K); **rs** Radio solar (6.96x10⁸m o 0.004652 UA) y **a0** Unidad Astronómica (149.597.870.700 m)

2.1.2. Influencia del Espectro de radiación solar

La radiación solar como se vio anteriormente es un conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el sol, debido a la emisión de energía del sol desde su interior por los procesos de fusión nuclear. El espectro electromagnético es el rango de todas las radiaciones electromagnéticas posibles y estas a su vez van desde ondas de muy baja

frecuencia como las ondas de radio hasta ondas de alta frecuencia como los rayos gamma, dependiendo estas principalmente de su longitud de onda, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2. 2)$$

Dónde:

λ Longitud de onda (m); c La velocidad de la luz (299.792.485 m/s) y

f Frecuencia (Hz)

Se pueden observar zonas del espectro electromagnético en la figura 5:

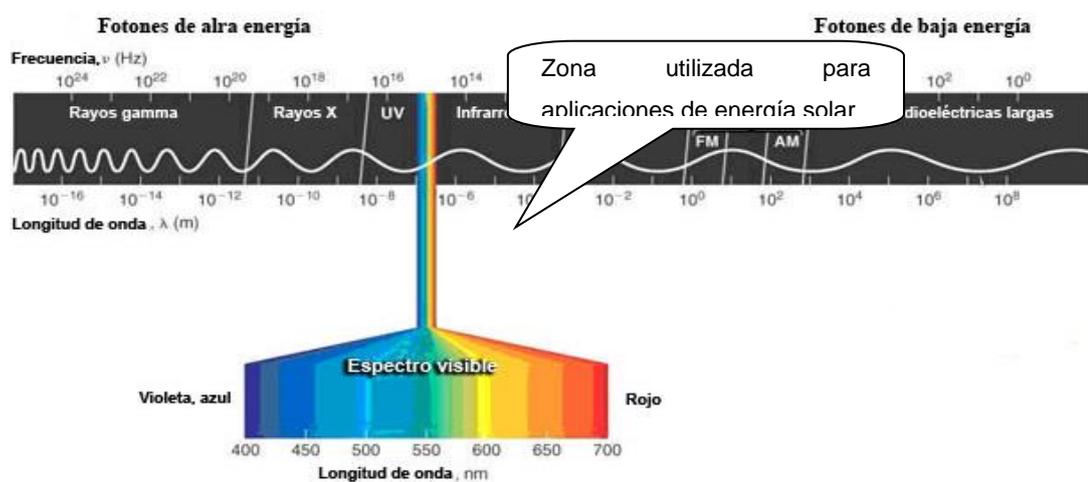


Fig. 5. Espectro electromagnético

De los rangos del espectro electromagnético que llegan hasta la tierra la zona ultravioleta es decir la de frecuencias altas que van desde las longitudes de onda desde 10⁻⁸ m hasta las de 10⁻¹⁶ m son absorbidas por el ozono de la atmosfera, casi en su totalidad y por el otro lado las zonas infrarrojas con frecuencias bajas son absorbidas por el dióxido de carbono y el vapor de agua de la atmosfera. El vapor de agua absorbe las bandas centradas en 1.0, 1.4 y 1.8 μm a longitudes de ondas mayores a 2.5 μm el

dióxido de carbono absorbe esta energía casi en su totalidad por lo cual la radiación entre $0.29\mu m$ hasta $2.5\mu m$ son tomadas en cuenta para las aplicaciones de energía solar.

2.1.3.Posicionamiento del Sol

El sol posee dos movimientos principales el uno es el de traslación y el otro de rotación este último dura aproximadamente 24 horas que da lugar al día y a la noche mientras que el de traslación tiene una duración de 365.2422 días para casos prácticos se tiene 365 días y cada cuatro años se tiene un año de 366 días, también llamado bisiesto.

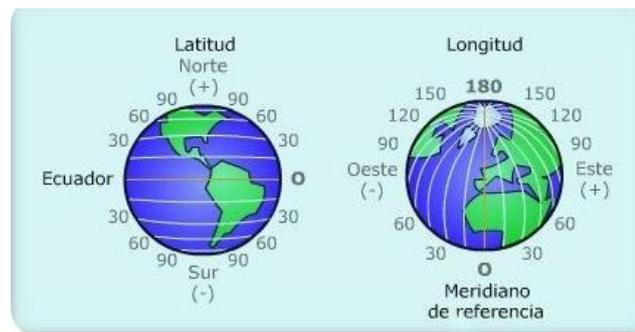


Fig. 6. Coordenadas de posición de un punto terrestre

Para poder ubicar cualquier punto en la tierra se necesita de los ángulos de latitud (φ) y de longitud (γ), el de latitud muestra el ángulo con respecto a la línea ecuatorial, mientras que el de longitud el ángulo con respecto al meridiano de Greenwich, que es el plano internacional para definir el huso horario. Esto se observa en la figura 6.

Para el caso del Ecuador se tiene:

$$\varphi = -0,186^\circ \text{ o } 0^\circ 15 \text{ min } S$$

$$\gamma = -78,4305^\circ \text{ o } 78^\circ 35 \text{ min } W$$

Durante el movimiento de traslación el planeta presenta una trayectoria elíptica y además una inclinación con respecto a la posición del sol, el ángulo que forma el plano del Ecuador terrestre con la dirección en la que se encuentra el sol se denomina ángulo de declinación δ y varía durante el año.

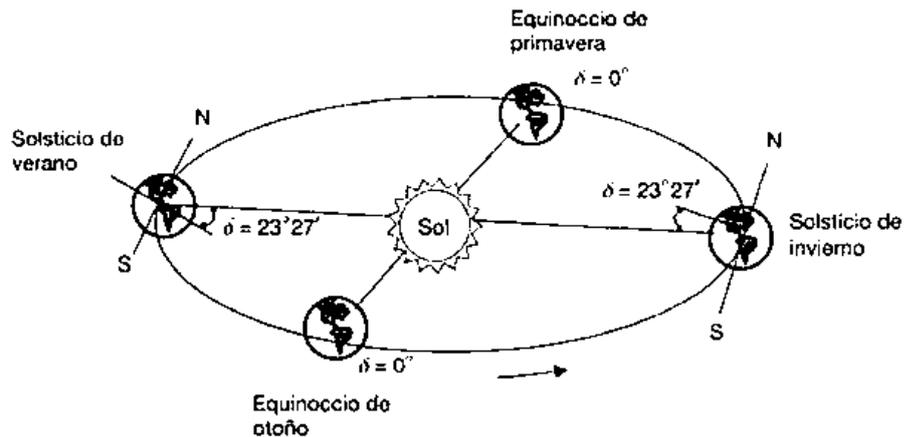


Fig. 7. Variación del ángulo de declinación a lo largo del año

Para el cálculo de este ángulo se tienen dos ecuaciones la de Lokmanhekim y la de Copper, siendo el de este último mucho más sencilla para su aplicación y se presenta a continuación en la fórmula (2.3):

$$\delta = 23.45 * \sin\left(360 \frac{248 + z}{365}\right) \quad (2.3)$$

Dónde:

δ Declinación en grados sexagesimales y z es el número del día del año.

El ángulo horario (hs) es el ángulo comprendido entre el meridiano local y la hora de estudio, en otras palabras el ángulo entre el mediodía solar y la hora de estudio, esta ecuación se expresa como:

$$hs = (12 - \text{hora deseada}) * 15^\circ \quad (2.4)$$

En base a estos datos se encontrará la posición del sol en coordenadas angulares. La posición se pueden calcular en coordenadas horarias y angulares para la aplicación del sistema de seguimiento son necesarias y mucho más útil el posicionamiento del sol en coordenadas angulares en el cual se toma como referencia el plano horizonte, que es plano tangente a la superficie de la tierra en el punto considerado, en lugar del plano ecuatorial y se sitúa el sol mediante dos ángulos:

- Altitud (β): Este ángulo es el comprendido entre la posición del sol y su proyección sobre el plano horizontal. Su origen está en el horizonte y se le considera positivo en sentido ascendente, también se lo conoce como altura del sol y se calcula de la siguiente forma:

$$\sin(\beta) = \cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(hs) + \sin(\gamma) \sin(\delta) \quad (2.5)$$

- Azimut (α): es el ángulo comprendido entre la dirección sur y la proyección del sol sobre el plano horizontal. El origen de los ángulos, se sitúa en la dirección sur y se consideran positivos los medidos hacia el oeste y negativos los medidos hacia el este.

$$\sin(\alpha) = \frac{\cos(\delta) \sin(hs)}{\cos(\beta)} \quad (2.6)$$

Algunas veces se usa el ángulo cenital, que es el complementario al ángulo de altitud, también se puede definir como el comprendido entre la posición del sol y el plano horizontal en el punto considerado. Se define como:

$$\psi = 90 - \beta \quad (2.7)$$

En la figura 8 se observa como se miden los ángulos mencionados.

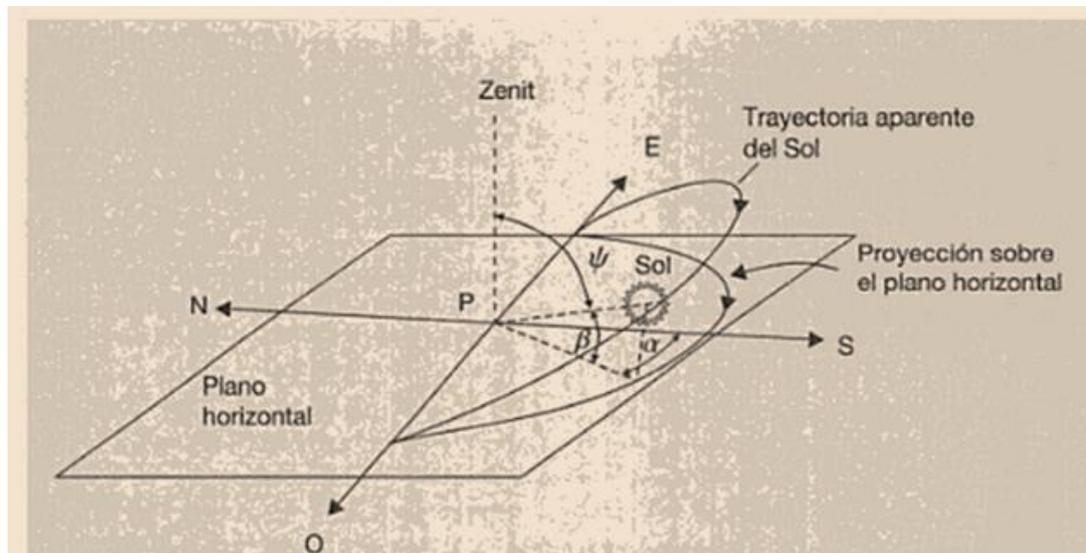


Fig. 8. Posición del sol con respecto a una superficie inclinada.

Para establecer los ángulos necesarios para el correcto dimensionamiento del seguidor solar se deben tener en cuenta estos ángulos.

2.1.4. Radiación solar en el Ecuador

Según datos del CONELEC (CONELEC, 2008)

En el Ecuador se tiene para insolación difusa promedio los siguientes datos. Para ver detalle ver Figura 1

- Valor Máximo: 3105 Wh/m²/día.
- Valor Mínimo: 2032 Wh/m²/día.
- Valor Promedio: 2737.05 Wh/m²/día.
- Desviación estándar: 196.8492 Wh/m²/día.

Se tiene también para insolación directa promedio. Para ver detalle ver Figura 2.

- Valor Máximo: 5119 Wh/m²/día.
- Valor Mínimo: 1147 Wh/m²/día.
- Valor Promedio: 2543.01 Wh/m²/día.
- Desviación estándar: 643.1827 Wh/m²/día.

Finalmente se presenta una figura de la insolación Global promedio en el Ecuador. Los valores de insolación y también por ende de irradiancia son determinantes para tener la idea de la cantidad de energía solar que existe de acuerdo a la posición geográfica del Ecuador. Ver figura 9.

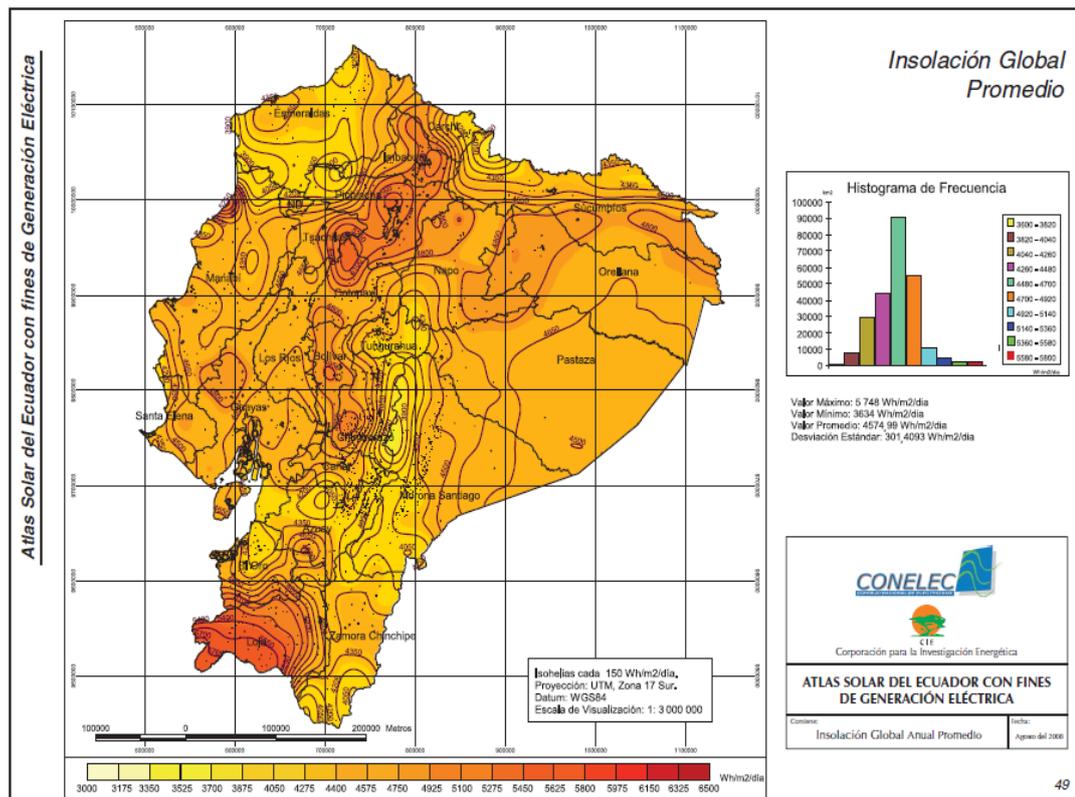


Fig. 9. Mapa de Insolación Global del Ecuador

2.1.5. Cálculo de la radiación solar local

La radiación solar que llega a un punto, está compuesta por diferentes tipos de radiación: Radiación Directa que como su nombre lo indica es la que llega directamente desde el sol, radiación difusa que se produce cuando la radiación solar que alcanza la superficie de la atmósfera de la Tierra se dispersa de su dirección original a causa de moléculas en la atmósfera, y la radiación de albedo la cual se produce por superficies que reflejan la radiación. La radiación total es la suma de todos estos tipos diferentes de radiaciones mientras que la radiación global no considera la Radiación de Albedo, ya que no es significativa en comparación al porcentaje de las otras dos.

La división de radiación solar global sobre una superficie horizontal en directa y difusa es importante por dos razones: (a) los métodos para calcular la radiación solar sobre una superficie en otra orientación a partir de datos horizontales requiere tratamiento separado para cada componente, (b) el cálculo del desempeño a largo plazo de la mayoría de los colectores concentradores debe basarse en estimados de disponibilidad de radiación directa.

Para determinar la radiación solar directa y difusa, que inciden sobre una superficie, existen diversos procedimientos sin embargo los valores obtenidos son solo valores de radiación aproximados, ya que estos procedimientos pueden ser afectados por la presencia de microclimas, perturbaciones y en general una serie de eventos no controlados. Para cuantificar dicha radiación, se debe partir de conocer la radiación extraterrestre (Duffie, 1974), la cual es la radiación que llegaría a la tierra si es que no existiera atmósfera.

Este valor de radiación se define mediante la fórmula (2.8):

$$H_e = \frac{24}{\pi} I_{sc} \left(\left[1 + 0,033 * \cos \left(\frac{360 * n}{365} \right) \right] \left[\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{2\pi \omega_s}{360} \sin \phi \sin \delta \right] \right) \quad (2.8)$$

Dónde:

H_e Radiación extraterrestre en kJ/m²hr; **I_{sc}** Constante solar (4871 kJ/m²hr); **n** Número de día del año; **ϕ** Latitud; **δ** ángulo de declinación, el cual varía a lo largo del año y **ω_s** ángulo horario de la puesta de sol.

La irradiación global a nivel del suelo para una superficie horizontal se determina con la siguiente expresión (Page, 1964):

$$H_o = H_e \left(a + b \frac{n}{N} \right) \quad (2.9)$$

Dónde:

H_o Es la irradiación global diaria, promediada mensual, sobre una superficie situada bajo la atmósfera, los coeficientes **a** y **b** dependen del tipo de clima, y **N** representa la duración del día.

Para el Ecuador, se tienen los siguientes valores de coeficientes a y b :

Tabla 1. Coeficientes climáticos a y b para el Ecuador

Región	a	b
Sierra	0.25	0.45
Costa	0.28	0.54

Por otra parte, para determinar la duración del día N se utiliza la siguiente fórmula:

$$N = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan\phi \tan\delta) \quad (2.10)$$

Sin embargo como se estableció anteriormente es necesario separar los distintos tipos de radiaciones por lo que el método usual es correlacionar H_d/H_o , la fracción difusa de radiación horaria sobre un plano horizontal en función de KT .

De acuerdo a la siguiente fórmula que considera la corrección debida a que la radiación mensual existe un componente estacional, indicado por el ángulo horario del atardecer ω_s :

Para $\omega_s < 81,4^\circ$ y $0,3 \leq \bar{K}_t \leq 0,8$

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}_o} = 1,391 - 3,560\bar{K}_T + 4,189\bar{K}_T^2 - 2,137\bar{K}_T^3 \quad (2.11)$$

Para $\omega_s > 81,4^\circ$ y $0,3 \leq \bar{K}_t \leq 0,8$

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}_o} = 1,311 - 3,022\bar{K}_T + 3,427\bar{K}_T^2 - 1,821\bar{K}_T^3 \quad (2.12)$$

En donde kT representa el índice de claridad promedio mensual y es la razón de la radiación diaria promediada mensualmente sobre una superficie horizontal, con respecto a la radiación extraterrestre diaria promediada mensualmente:

$$K_T = \frac{H_o}{H_e} \quad (2.13)$$

Con esto se puede encontrar la radiación total sobre una superficie horizontal la cual se encuentre perpendicular a la dirección de la radiación, pero para una superficie horizontal inclinada a la dirección de la radiación se debe corregir con el factor R_b .

Para el cálculo se asume que la intensidad de la radiación difusa de cielo es uniforme independientemente del sector de cielo del cual provenga, esta se consideración se emplea en modelos isotrópicos (Badescu, 2002; Tian y otros, 2001; Koronakis, 1986; Steven y Unsworth, 1986; Lui y Jordan, 1963). Otros proponen que la radiación difusa de cielo se puede considerar formada por dos componentes, una parte isotrópica recibida uniformemente desde la bóveda celeste y otra parte, conocida como circunsolar, resultante de la dispersión hacia delante de la radiación solar y concentrada en el cielo alrededor del sol (Hay, 1979). Otros además, consideran una tercera componente, conocida como brillo del horizonte y que es más notable en días claros (Reindl, 1990; Skartveit y Olseht, 1986; Ma e Iqbal, 1983). Estos últimos se denominan modelos anisotrópicos. (M.J. Denegri, 2012).

Si la radiación difusa y la reflejada por la tierra se suponen isotrópicas, la radiación solar promedio mensual sobre una superficie inclinada sin sombra es:

$$\overline{H_T} = \overline{H_o} \left(1 - \frac{\overline{H_d}}{\overline{H_o}} \right) \overline{R_b} + \overline{H_d} \left(\frac{1 + \cos\beta}{2} \right) + \overline{H\rho_g} \left(\frac{1 - \cos\beta}{2} \right) \quad (2.14)$$

Dónde:

$\overline{H_T}$ Es la radiación total sobre una superficie horizontal inclinada; $\overline{H_o}$ es la radiación total diaria promediada mensualmente; $\overline{H_d}$ es la radiación difusa; $\overline{R_b}$ es la razón de la radiación directa diaria promedio sobre una superficie inclinada con respecto a una superficie horizontal; $\overline{H\rho_g}$ es la radiación de albedo en factor tanto por uno; y β es el ángulo de inclinación de la instalación y correspondiente a $|\phi - \delta|$.

Para pasar la irradiación sobre una superficie horizontal inclinada se utiliza el factor R_b . Dicho factor para el caso del Ecuador se calcula con la ecuación (2.15):

$$R_b = \frac{\cos(\phi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\phi - \beta) \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta} \quad (2.15)$$

Finalmente se encuentra la irradiación directa

$$H_b = H_o - H_d$$

Y se calcula la irradiación directa sobre una superficie inclinada.

$$H_B = H_b * R_b$$

2.2. SISTEMAS FOTO TÉRMICOS CONCENTRADORES

2.2.1. Definiciones

El sistema que se construirá es un concentrador foto térmico que en este caso será la lupa solar, un sistema foto térmico concentrador, consta de las siguientes partes según (Gonzalez, 2009):

- Concentrador. Se denomina al sistema óptico que permite focalizar la radiación solar sobre una superficie receptora, sobre una superficie de menor tamaño.
- Receptor. Es la parte del sistema destinada a transformar la energía solar en energía térmica o eléctrica, puede estar compuesta por superficie absorbente y un aislamiento térmico.
- Sistema de seguimiento. Este sistema es el cual se encarga de orientar el sistema hacia el sol generalmente consta de un motor pero en los últimos años se han desarrollado nuevas alternativas.

2.2.2. Tipos de sistemas foto térmicos concentradores

Los mecanismos de focalización pueden ser muy variadas formas a continuación se muestran algunas que se presentan en la figura 10.

- Receptor plano con reflectores planos (a): es el sistema más sencillo y económico consta de espejos planos que reflejan la luz, su grado de concentración es bajo y usualmente no utilizan sistema de seguimiento.
- Concentrador parabólico (b): se basa en el paraboloide de revolución, concentra la radiación recibida en su foco permitiendo alcanzar altas temperaturas y generalmente tiene sistemas de seguimiento.
- Concentrador cilindro parabólico (c): el reflector es una superficie cilíndrica pero con perfil parabólico permitiendo concentrar la energía en el foco del paraboloide también permite alcanzar altas temperaturas y generalmente posee sistemas de seguimiento.
- Concentración por refracción de fresnel (e): entre la superficie que absorbe la energía y el sol se pone una lente de fresnel que permite concentrar en un foco común permite ahorrar material y llegar a altas temperaturas es muy poco usado.

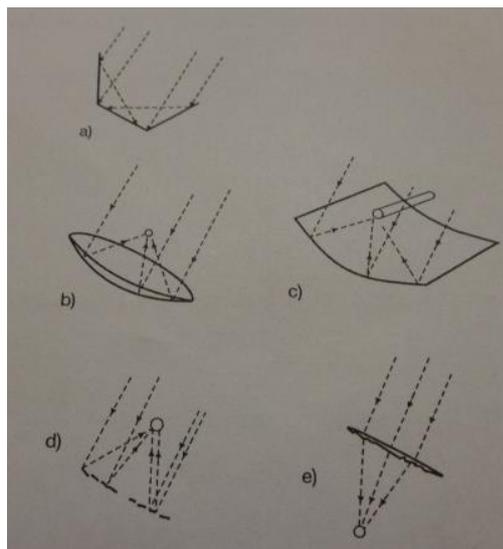


Fig. 10 Distintos tipos de colectores solares concentradores

El concentrador que se diseñara para el sistema de fotohidroconversión es de tipo concentrador parabólico que se puede observar en la figura 10 (b), que posee agua entre el acrílico de la parábola y su tapa, que funciona como medio óptico para el funcionamiento de la lente.

2.3. FUNDAMENTOS MATEMÁTICOS

2.3.1. Parábola

Matemáticamente se define a la parábola como el lugar geométrico de los puntos de un plano que equidistan de una recta dada, llamada directriz, y de un punto exterior a ella, llamado foco. De esta forma, una vez fija una recta y un punto se puede construir una parábola que los tenga por foco y directriz de acuerdo a la siguiente construcción. Sea T un punto cualquiera de la recta directriz. Se une con el foco dado F y a continuación se traza la mediatriz (o perpendicular por el punto medio) del segmento TF. La intersección de la mediatriz con la perpendicular por T a la directriz da como resultado un punto P que pertenece a la parábola ver figura 11.

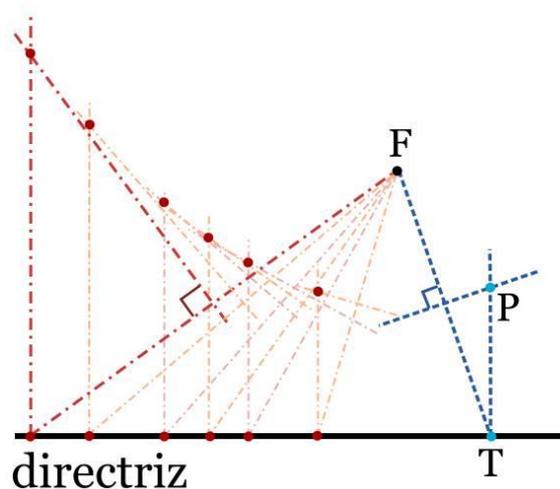


Fig. 11. Grafica formación de la parábola

De la construcción anterior se puede probar que la parábola es simétrica respecto a la línea perpendicular a la directriz y que pasa por el foco. Al punto de intersección de la parábola con tal línea (conocida como eje de la parábola) se le conoce como vértice de la parábola y es el punto cuya distancia a la directriz es mínima. La distancia entre el vértice y el foco se conoce como distancia focal o radio focal.

La ecuación de una parábola con vértice en $(0,0)$ y foco en $(0, p)$ es:

$$x^2 = 4py \quad (2.16)$$

2.3.2. Paraboloide de Revolución

Como se observa la parábola presenta una gran ventaja debido a la convergencia de sus puntos en el punto focal, sin embargo para poder emplear dicha característica se necesita un elemento espacial y no únicamente la parábola en el plano. Es por esto que se emplea un paraboloides de revolución.

Paraboloide de Revolución es la superficie generada por la rotación de una parábola alrededor de su eje de simetría. Un ejemplo se puede ver en la figura 12.

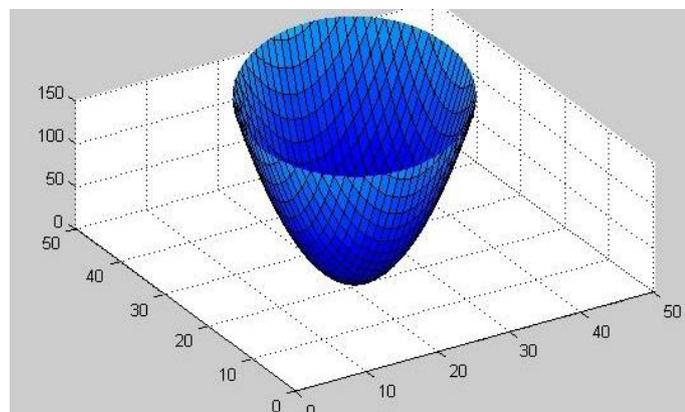


Fig. 12. Paraboloide de revolución elaborada en Matlab

Para la explicación de la ecuación del paraboloides de revolución (Schmidtke, 2011) se utiliza el sistema de coordenadas $(O, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$, donde O es el vértice de la parábola, \vec{k} un vector director del eje de simetría (tanto de la parábola como del paraboloides), y (\vec{i}, \vec{j}) una base del plano perpendicular al eje, entonces la ecuación de la superficie es la que se presenta en la ecuación (2.17):

$$z = a * (x^2 + y^2), \quad a \neq 0 \quad (2.17)$$

Esta ecuación proviene de la de la parábola: $y = a \cdot x^2$ donde se ha remplazado la variable "y" por "z" porque la parábola que genera la paraboloides es vertical ("de pie"), y luego se remplaza x^2 por $x^2 + y^2$ para incluir la tercera dimensión. Así la parábola de referencia $y = x^2$ genera por rotación el paraboloides

$$z = x^2 + y^2.$$

La intersección de una paraboloides de la ecuación 2.17 con un plano horizontal genera un círculo en la superficie y la intersección con un plano vertical genera la parábola, anteriormente descrita, para aclarar esta idea ver la fig. 13

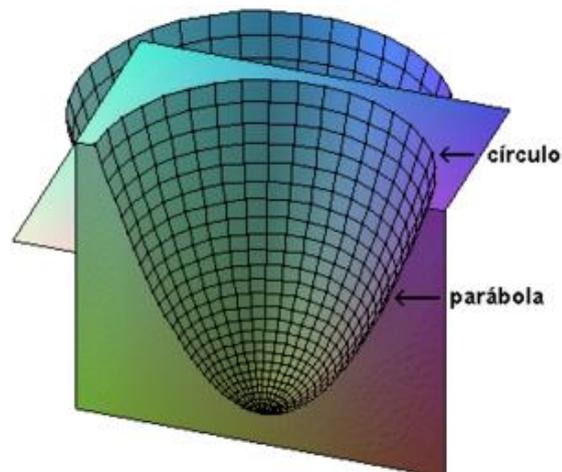


Fig. 13. Intersección de la parábola con un plano vertical y uno horizontal

La ecuación 2.17 muestra la ecuación del paraboloides que se necesita para el estudio del concentrador, debido a que el concentrador tiene una boca de forma circular es decir la superficie que se puede ver si se corta con el plano horizontal.

Si se desea que la boca del concentrador sea de forma diferente como por ejemplo una elipse entonces, eligiendo el sistema de coordenadas adecuado, la ecuación será de la forma:

$$z = A * x^2 + B * y^2 \quad (2.18)$$

Donde se puede imponer $A > 0$ (cambiando z por $-z$ si hace falta). Si B es también positivo, se pone

$$A = \frac{1}{a^2}, \quad B = \frac{1}{b^2} \quad (2.19)$$

, y la ecuación será:

$$z = \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} \quad (2.20)$$

El paraboloides de revolución Fig. 11 comparte con su análoga bidimensional la parábola la propiedad del punto focal: todos los rayos paralelos al eje, al tocar la superficie son reflejados y convergen en un único punto llamado foco. Este principio es utilizado por las llamadas «antenas parabólicas» que de hecho son paraboloides, ya que en el foco se encuentra el receptor de ondas.

Ahora bien es necesario conocer en donde se encuentra ubicado ese punto de convergencia. Para esto se calcula la distancia focal, es decir la que separa el foco del vértice, para el paraboloides de ecuación 2.17 igual a

$$z = a \cdot (x^2 + y^2),$$

La distancia es:

$$d = \frac{1}{4a} \quad (2. 21)$$

Cuanto más llano es paraboloides (menor es el parámetro a) más lejos se encuentra el foco (Schmidtke, 2011).

Esta propiedad, se emplea cuando los rayos que llegan al paraboloides son reflejados, ya que son reflejados en el foco verdadero de la parábola, pero para el caso en que los rayos no son reflejados sino que atraviesan su interior es necesario considerar un fenómeno diferente basado en la refracción de la luz, principio básico de funcionamiento de las lentes.

El concentrador debe ser llenado de agua motivo por el cual se necesita saber cuál será el volumen de la paraboloides para saber la cantidad de agua que ingresa. Para este cálculo se parte de la ecuación de la paraboloides 2.17 que es la que se tiene en el concentrador entonces se utiliza el cálculo de múltiple variable para encontrar el volumen por medio de la integración. Se tiene la siguiente ecuación:

$$z = a * (x^2 + y^2), \quad a \neq 0$$

Se sabe también que la paraboloides del concentrador se corta con un plano $z = h$, que en este caso vendría a ser la parte superior del concentrador, teniendo en cuenta esto se pasa a coordenadas cilíndricas para una más fácil resolución del problema y se obtiene entonces en coordenadas cilíndricas las siguientes equivalencias (Steward, 2008):

$$\begin{aligned} x &= \rho * \cos(\theta) \\ y &= \rho * \sin(\theta) \\ z &= z \\ \rho^2 &= x^2 + y^2 \end{aligned} \quad (2. 22)$$

Se debe tener en cuenta además que el volumen de un cuerpo está dado como la integral triple de su diferencial sobre una superficie en otras palabras:

$$V = \iiint_s dv \quad (2.23)$$

Dónde:

V Es el volumen del cuerpo; s es la superficie sobre la cual se generan los límites de integración y dv es el diferencial de volumen del sólido.

Ahora si teniendo en cuenta el diferencial dv anteriormente visto en coordenadas rectangulares sería:

$$dv = dx \cdot dy \cdot dz \quad (2.24)$$

Ahora en coordenadas cilíndricas se tendría lo siguiente:

$$dv = \rho \cdot dz \cdot d\rho \cdot d\theta \quad (2.25)$$

Una vez definido el diferencial se deben aclarar entonces los límites de integración para lo cual se parte de la siguiente figura 14 que muestra la parte superior del concentrador:

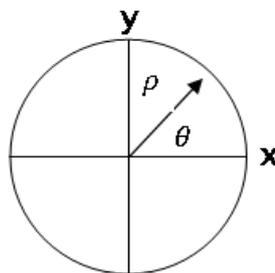


Fig. 14. Circunferencia que muestra límites de integración

Se tienen entonces los siguientes límites:

$$\begin{aligned} z &\rightarrow 0 - h \\ \rho &\rightarrow 0 - \rho \\ \theta &\rightarrow 0 - 2\pi \end{aligned} \quad (2.26)$$

Determinados los límites se tendría que para una paraboloides de revolución de altura h con radio ρ y el ángulo de la circunferencia que es entre $0 - 2\pi$, la siguiente ecuación:

$$V = \int_0^{2\pi} \int_0^{\rho} \int_0^h \rho \cdot dz \cdot d\rho \cdot d\theta \quad (2.27)$$

Entonces la ecuación 2.27 define el volumen del concentrador. Si se evalúa la ecuación entre los límites se tiene lo siguiente:

$$V = \frac{\pi}{2} \cdot \left(\frac{2 \cdot h \cdot \rho^2 - \rho^4}{2} \right) \quad (2.28)$$

Dónde:

V Es el volumen de la parábola de revolución; h es la altura del paraboloides y ρ es el radio de la circunferencia formada por el paraboloides al ser cortada con el plano horizontal.

Para el cálculo del área de la parábola de revolución se utiliza una de las aplicaciones de la integral, con el concepto de cálculo del área de la superficie al hacer rotar una función alrededor de un eje, se puede utilizar la fórmula 2.29 debido a que es un paraboloides de revolución:

$$S = 2\pi \cdot \int_a^b f(x) \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{df(x)}{dx}\right)^2} \cdot dx \quad (2.29)$$

Para la forma de la ecuación $x^2 = 4 * f * y$ se tiene una parábola con el vértice alrededor del eje "y", pero la ecuación que se necesita es solo una parte de la parábola "y" que este alrededor del eje "x", para lo cual se tiene lo siguiente:

$$x = cte * \sqrt{y} \quad (2.30)$$

Determinado eso entonces la fórmula que se necesita es $x = cte * \sqrt{y}$ porque es la que rota alrededor del eje y, de modo que se integrara en función de "y", y se asume también que $cte = \dot{a}$

Entonces se aplica la fórmula 2.29 en la ecuación $x = \dot{a} * \sqrt{y}$ el área superficial del paraboloides de revolución alrededor del eje "y", entonces se obtiene la fórmula (2.31):

$$S = 2 \cdot \pi \int_0^z (\dot{a} \cdot \sqrt{y}) \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{d(\dot{a} \cdot \sqrt{y})}{dy}\right)^2} \cdot dy \quad (2.31)$$

En la ecuación de la superficie se tiene z que vendría ser la altura h y $\dot{a} = \sqrt{4 \cdot \rho}$ con esta igualdad se obtienen todas las variables en función de las anteriormente usadas en el paraboloides de revolución para el volumen. Resolviendo la integral se obtiene entonces lo siguiente:

$$S = \frac{\dot{a} \cdot \pi}{6} \left(\sqrt{4 \cdot z + \dot{a}^2} \right)^3 \quad (2.32)$$

2.3.3. Paraboloides como concentrador

El diseño de lupa solar se basa en el diseño de un paraboloides que hace la función de lente para permitir aumentar la energía que recibe como

radiación solar, a continuación se muestra un ejemplo de una figura del paraboloide la cual se desea diseñar en la figura 15.



Fig. 15. Concentrador tipo paraboloide

2.3.4. Teoría de Antenas

Para poder entender ciertos términos que ayudaran al diseño del concentrador, se utilizara la teoría de antenas y su diseño. (Nestor, 2014).

2.3.5. Definiciones en la parábola

Se parte de la información

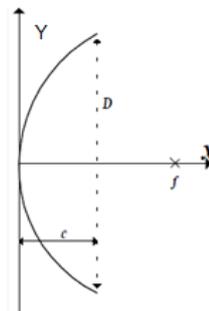


Fig. 16. Parábola que se abre alrededor del eje x

Dada una parábola de boca D y distancia focal f (fig.17). Se tienen las siguientes ecuaciones:

$$y^2 = 4 * f * x$$

$$y^2 = \frac{f}{D} * 4 * D * x \quad (2. 33)$$

Como:

$$x = \frac{y^2}{4 * f}, \text{ en la boca de la parábola es: } y = \frac{D}{2}$$

$$\therefore c = \frac{D^2}{16 * f} \text{ o también } c = \frac{D}{16(f/D)} \quad (2. 34)$$

Dónde:

D Boca de la parábola; f distancia focal y c profundidad de la parábola en el centro

Debe advertirse que en las ecuaciones 2.33 y 2.34, se han acomodado los términos para agrupar una relación de foco a diámetro (f/D). Se verá más adelante la importancia de esta relación para el diseño de un reflector parabólico, en particular, cuando deba vincularse éste, con la fuente primaria (iluminador).

2.3.6. Relación entre el Foco y el Diámetro del Paraboloides f/d

En la fig. 17, se ve que uniendo la boca del paraboloides con el foco, se forma un ángulo sólido ξ . Este ángulo depende de la distancia focal f para un diámetro D constante. ξ es mayor, en la medida que f se aproxime al vértice del paraboloides, y menor, si f se aleja. En la fig. 18 se muestra una

fuente primaria que ilumina reflectores con igual diámetro, pero, con diferentes distancias focales.

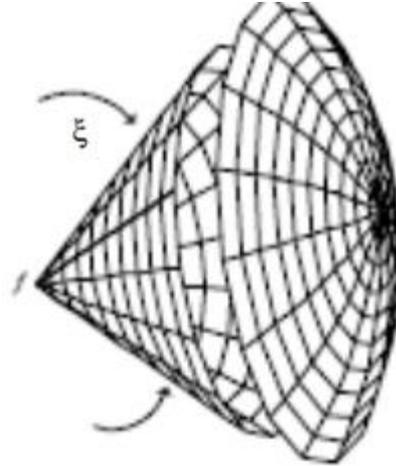


Fig. 17. Figura de parábola que muestra la relación f/D

Para iluminar adecuadamente el reflector, la fuente primaria debe tener un diagrama de radiación con un ángulo sólido similar a ξ . Como se puede apreciar en la figura 18, el diseño de una fuente primaria y su diagrama de radiación, debe coincidir con la relación foco a diámetro (f/D) del paraboloides, esto, a fin de obtener una adecuada ganancia y buen rendimiento del sistema.

Es de advertir que una antena primaria actuando con un reflector de muy baja relación, $f/D \ll 0,25$, es muy sensible a los cambios de frecuencia.

Pequeñas variaciones de frecuencia, provocan cambios en la impedancia del punto de excitación, y esto ocasiona pérdidas por desadaptación. Además, los reflectores con muy baja relación foco diámetro exigen mayor precisión en la construcción, que aquellos con mayor relación f/D .

Un buen compromiso es: $0,25 < f/D < 0,6$.

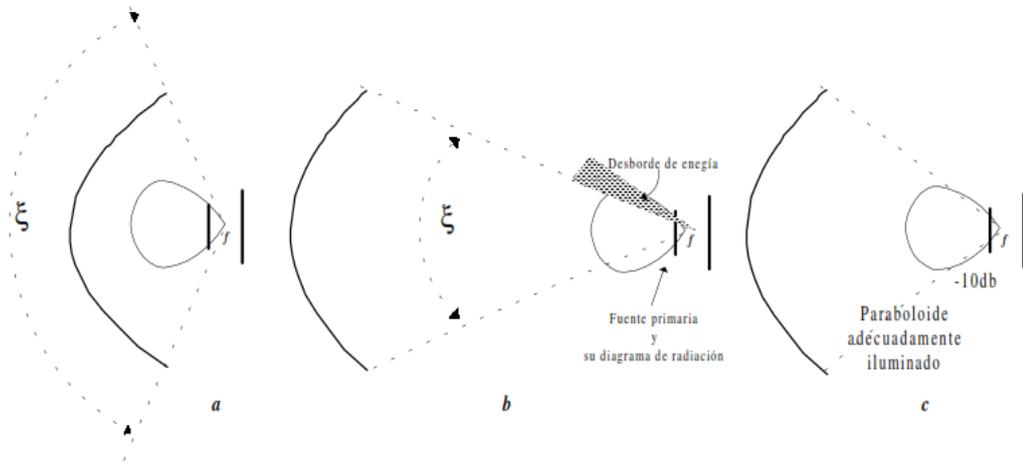


Fig. 18. Fuente de reflectores para diferentes diámetros

La relación encontrada anteriormente es útil para tener una idea de la relación entre el foco y el diámetro de boca del concentrador.

2.3.7. Lentes

Una lente es un elemento óptico transparente, fabricado con vidrio, cristal o plástico, que refracta la luz para formar una imagen. Una lente puede tener superficies cóncavas o convexas, de manera que la luz paralela que incide sobre ella sea refractada bien hacia el plano focal, como en una lente convergente, o bien desde él, como en una lente divergente.

Una lente que es delgada en comparación con su diámetro tendrá un punto focal más distante (es decir, una mayor longitud focal) que una gruesa, será más fácil de fabricar y sufrirá menos aberración cromática y aberración esférica. Sin embargo si la relación de su espesor y su diámetro no es despreciable se trata de una lente gruesa. (Astrociencia, 2011).

Ahora bien la lente debido a la refracción de la luz genera un cambio en el ángulo de los rayos luminosos, el cual con la geometría adecuada permite que los rayos converjan en un punto llamado foco de lente.

Este foco se encuentra a una distancia determinada de la lente y va a depender de la geometría de la superficie y del índice de refracción del material. Así para una lente delgada se tiene que:

$$\frac{1}{f} = \left(\frac{n_2}{n_1} - 1 \right) * \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (2.35)$$

En donde:

f es la distancia al punto de convergencia; n_2 es el índice de refracción del material de la lente; n_1 es el índice de refracción del medio; R_1 y R_2 son los radios de curvatura de las caras de la lente.

Esta es la llamada la ecuación de los fabricantes de lentes. (Alvarenga & Ribeiro, 1998). Sin embargo esta ecuación solo considera un material de la lente y es válida solo para lentes delgadas por lo que es necesario ampliarla.

En forma matemática el índice de refracción (n_c) para este caso, se expresa así:

$$n_c = \frac{\frac{n_{ml}}{n_{mrel}}}{\frac{n_{ml}}{n_{mrel}}} \quad (2.36)$$

$$n_c = \left(\frac{n_{ml}}{n_{mrel}} \right)^2$$

Dónde:

n_c Es el índice de refracción compuesto; n_{ml} es el Índice de refracción del material del lente e n_{mrel} índice del medio o relleno del concentrador.

Estos materiales se explican en la figura 19.



Fig. 19. Medios que atraviesa la luz para el cálculo del índice de refracción.

En el caso del concentrador se tiene un lente grueso para lo cual se debe aplicar la ecuación de lente gruesa:

$$P = P1 + P2 - P1 * P2 * \frac{d}{n} \quad (2.37)$$

$$P = \frac{1}{f} = \left(\frac{n2}{n1} - 1 \right) * \left(\frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} \right) - \frac{\left(\frac{n2}{n1} - 1 \right) * d}{\frac{n2}{n1} * R1 * R2} \quad (2.38)$$

Dónde:

$\frac{n2}{n1}$ Es el índice compuesto nc , $R1$ y $R2$ son los radios de curvatura del lente y d es el grosor de la lente,

Estas dimensiones se pueden apreciar en la figura 20.

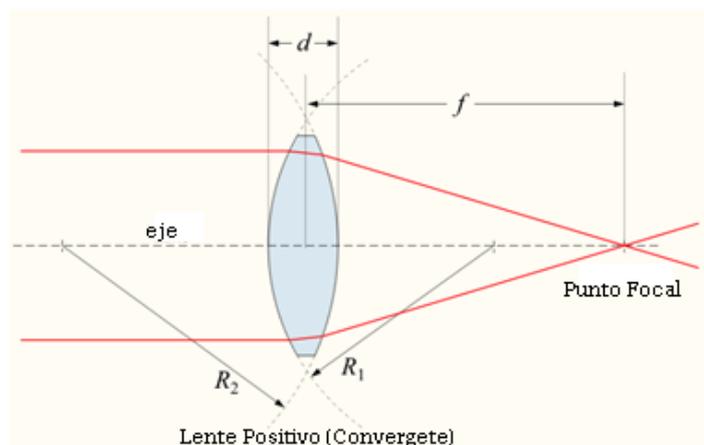


Fig. 20. Lente Grueso Convergente

En la figura 21 se pueden ver como inciden los rayos divergentes.

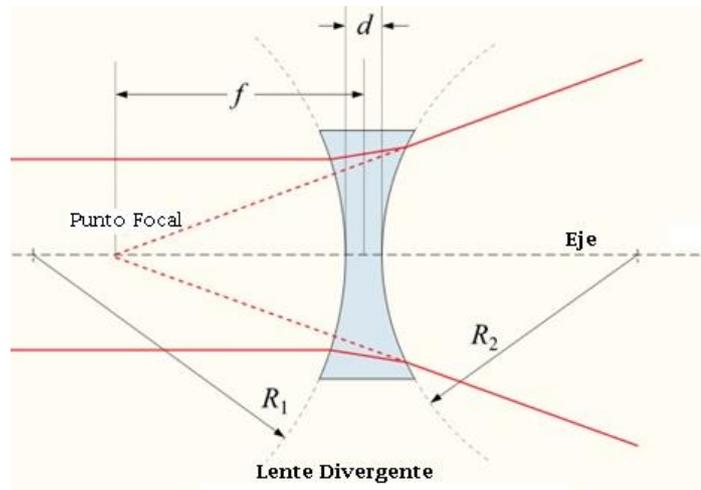


Fig. 21. Lente Gruesa Divergente

Para esta ecuación se debe utilizar la convención de signos cartesianos, es decir el lado derecho como positivo e izquierdo como negativo de la siguiente manera, figura 22:

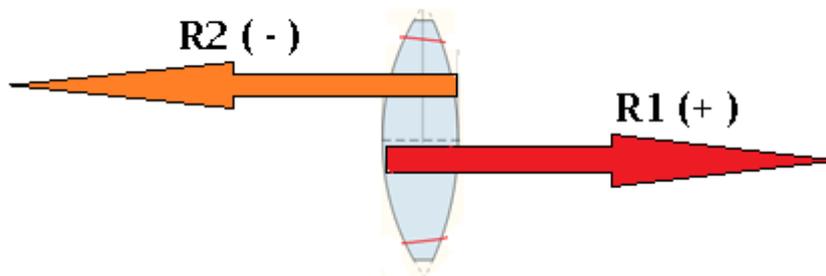


Fig. 22. Convención de signos cartesianos

Se toman los sentidos partiendo de los puntos cóncavos de cada lado de la lente. Determinados los sentidos se tendría la siguiente ecuación:

$$P = \frac{1}{f} = (nc - 1) * \left(\frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} \right) - \frac{(nc - 1) * d}{nc * R1 * R2} \quad (2. 39)$$

Para la selección del material de construcción de la lente se verificaron varios materiales, y se desarrolló la siguiente tabla para su selección, tomando en cuenta dos posibles materiales para la fabricación del concentrador debido a mejores índices de refracción en materiales sólidos que permitan una factible manufacturación

Tabla 2. Tabla de comparación entre materiales

Tabla de comparación de materiales			
	nca	costo	manufactura
Vidrio	1,5-1,6	alto	difícil
Acrílico	1,48	medio	fácil

De la tabla se puede observar que es una mejor elección el acrílico por las razones descritas una vez elegido el material de manufacturación se podrá trabajar con el índice de refracción **nca** del acrílico y también con el del agua **nc H₂O** que es de 1.333.

Aplicando la ecuación 2.36 se tiene entonces:

$$nc = \left(\frac{n_{ml}}{n_{mrell}} \right)^2$$

$$nc = \left(\frac{1.48}{1.333} \right)^2$$

$$nc = 1.249$$

Las ecuaciones anteriores permitirán dimensionar de manera adecuada el ancho y foco de la parábola que se desea diseñar para lo cual se realizan los cálculos siguientes a partir de la ecuación 2.33:

$$x^2 = 4 * \frac{f}{D} * D * y$$

Para el cálculo se tomara un diámetro de 1m, una relación f/D de 0.6 como primera aproximación y cálculo.

$$D = 1m$$

$$\frac{f}{D} = 0.6$$

$$\frac{1}{c} = 16 * \frac{f}{D}$$

$$\frac{1}{c} = 9.6$$

$$C = 0.1041$$

$$f = D * \left(\frac{f}{D}\right) = 0.6$$

$$f = 0.6$$

$$x^2 = 4fy$$

$$x^2 = 4 * 0.6 * y$$

Resolviendo cálculos anteriores se llegó a la ecuación de la parábola que define el concentrador:

$$x^2 = 2.4 * y$$

$$x_1 = 0,25 ; y_1 = 0,026$$

$$x_2 = 0,5 ; y_1 = 0,1042$$

Con los puntos de la ecuación se dibujará en un software y con su ayuda obtener el radio de curvatura que se genera en la parábola ver figura 23.

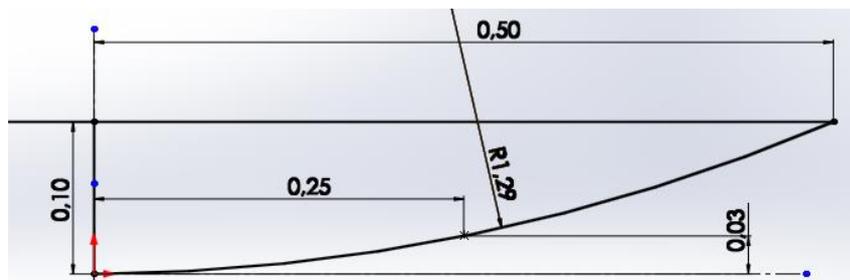


Fig. 23. Grafica para encontrar el radio de curvatura.

Una vez obtenido el radio de curvatura se asume que se realizara biconvexa simétrica por lo tanto el radio de curvatura de la otra cara será igual al primero, de modo que utilizando la ecuación del fabricante de lentes para lentes gruesas ecuación 2.38 se tiene:

$$P = \frac{1}{f} = (nc - 1) * \left(\frac{1}{R1} - \frac{1}{R2} \right) + \frac{(nc - 1) * d}{nc * R1 * R2}$$

$$\frac{1}{f} = (1.249 - 1) * \left(\frac{1}{1.29} - \frac{-1}{1.29} \right) + \frac{(1.249 - 1) * (0.1041 + 0.1041 + 0.01)}{1.249 * 1.29 * 1.29}$$

$$\frac{1}{f} = (0.3860) - \frac{0.52}{3.829}$$

$$\frac{1}{f} = 0.2501$$

$$f = 3.9 \text{ m}$$

Del cálculo se encuentra que el foco se ubica a casi 4m el foco de incidencia o foco inverso y con un ancho d de 20cm, se va a realizar a continuación en la tabla 3 el cálculo para varias medidas de tal manera de escoger la mejor utilizando el mismo formato de cálculo.

Tabla 3. Tabla para obtención del radio de curvatura

Diám Concen- trador	Relación f/D	Inverso Distancia C	Distancia C	Foco pará- bola	Punto Y	Punto X	Radio de curvatura
D	f/D	1/C (m ⁻¹)	C (m)	f (m)	y (m)	X (m)	rc (m)
1	0,6	9,6	0,10416667	0,6	0,05	0,3464	1,53
1	0,6	9,6	0,10416667	0,6	0,05	0,3464	1,26
1	0,8	12,8	0,078125	0,8	0,05	0,4	1,64
1	0,8	12,8	0,078125	0,8	0,05	0,4	1,46
1	0,6	9,6	0,10416667	0,6	0,05	0,3464	1,08

Con el radio de curvatura de encontrado por software se obtiene los datos de la tabla 4 mostrada a continuación:

Tabla 4. Tabla de comparación de potencias de las lentes.

Potencia de la lente	Foco inverso del lente biconvexa	Potencia de la lente plano - convexa	Foco de la lente plano - convexa
$1/f_i$ (m^{-1})	f_i (m)	$1/f_i'$	f_i'
0,3069	3,2583	0,1627	6,1446
0,3678	2,7186	0,1976	5,0602
0,2875	3,4784	0,1518	6,5863
0,3207	3,1183	0,1705	5,8635
1,4000	2,7143	0,2306	4,3373

Si bien se encuentra que la mejor elección sería una lente biconvexa por su mayor cercanía en el foco, se debe también tomar en cuenta tanto el área como el volumen debido a que el peso que se genera es bastante grande, para lo cual se desarrolló la siguiente tabla tomando en cuenta las ecuaciones 2.28 y 2.32.

Tabla 5. Tabla de comparación entre volumen peso y área de las lentes.

Volumen biconvexa	Peso biconvexa	Área Superficial biconvexa	Volumen plano-convexa	Peso plano convexa	Área superficial plano convexa
V (m^3)	P (Kg)	A (m^2)	V_1 (m^3)	P_1 (Kg)	A_1 (m^2)
0,0818	81,8123	1,6371	0,0409	40,9062	1,6040
0,0818	81,8123	1,6371	0,0409	40,9062	1,6040
0,0614	61,3592	1,6085	0,0307	30,6796	1,5897
0,0614	61,3592	1,6085	0,0307	30,6796	1,5897
0,0818	81,8123	1,6371	0,0409	40,9062	1,6040

De las tablas obtenidas por razones de peso sería mejor un lente plano convexo con el radio de curvatura de 1.08m y que posea una distancia "C" de 12 cm, ya que con estas características también se obtiene un peso aceptable para su movimiento. El tipo de lente se puede observar en la figura 24.

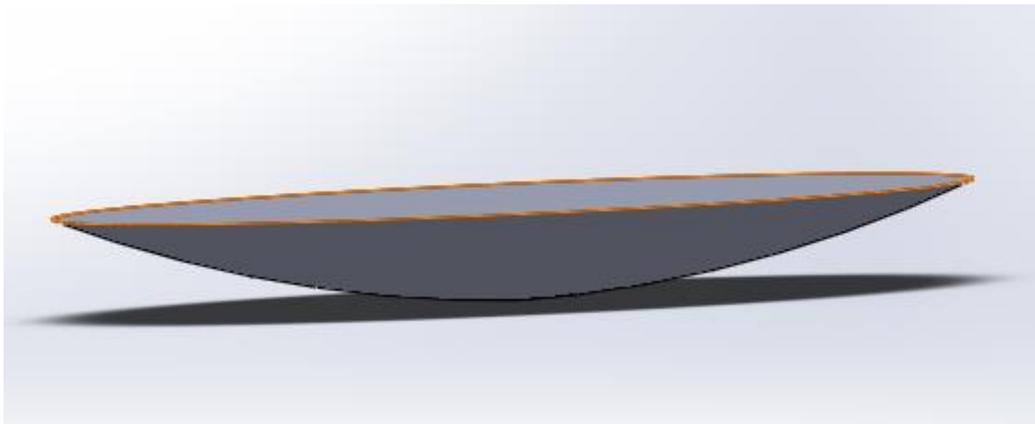


Fig. 24. Lente plano – convexa.

2.4. TRANSFERENCIA DE CALOR

Para el análisis del sistema se tiene que analizar primero de manera breve el fenómeno de transferencia de calor, que según (INCROPERA, 1999), manifiesta que: “La transferencia de calor (o calor) es la energía en tránsito debido a una diferencia de temperaturas”

Lo que dará a entender entonces que siempre que exista una diferencia de temperaturas en cualquier cuerpo o entre cuerpos se dará una transferencia de calor. Se manifiesta también que existen tres tipos de transferencia de calor:

- Conducción: se produce entre medios estacionarios.
- Convección: se produce de una superficie a un fluido en movimiento.

- Radiación: También denominada radiación térmica se produce entre dos superficies a diferentes temperaturas.

El fenómeno que interesa es el de radiación que es la energía emitida en una materia a una temperatura finita.

2.4.1.Elementos de un sistema de fotohidroconversion.

- El sistema consta de tres partes fundamentales que son:
- El concentrador solar, es un paraboloide de acrílico que en su interior consta de una cierta cantidad de agua destilada y es sellada por otra tapa de acrílico.
- La estructura Mecánica: es diseñada de tal manera que permita sostener el peso de la lupa solar y que además de la facilidad de realizar los movimientos de seguimiento solar, además cuenta con una cámara que permite monitorear las variables de temperatura que genera la lupa solar.
- Sistema de tracking solar: este sistema se compone de un sistema de seguimiento solar programado mediante un micro controlador y una interfaz gráfica que permite monitorear los datos.

CAPÍTULO 3

DISEÑO MECÁNICO

3.1. DISEÑO DEL CONCENTRADOR SOLAR

El sistema consta de tres partes fundamentales que son:

- El concentrador solar, es un paraboloide de acrílico que en su interior consta de una cierta cantidad de agua destilada y es sellada por otra tapa de acrílico.
- La estructura Mecánica: es diseñada de tal manera que permita sostener el peso de la lupa solar y que además de la facilidad de realizar los movimientos de seguimiento solar, además cuenta con una cámara que permite monitorear las variables de temperatura que genera la lupa solar.
- Sistema de tracking solar: este sistema se compone de un sistema de seguimiento solar programado mediante un micro controlador y una interfaz gráfica que permite monitorear los datos.

El material del concentrador fue seleccionado anteriormente como se indicó en la tabla 2. Anteriormente en el cálculo de la distancia focal se obtuvo una distancia de 4.33 m y la geometría de la lupa es plano – convexa. Para el empaque o sello mecánico se considera que el empaque no debe presentar fugas de agua y debe soportar el torque ejercido por los

pernos de manera que se no fracture por estos, teniendo en cuenta estos parámetros se ha seleccionado el empaque automotriz, un caucho que tiene la propiedad de aislar el agua entre componentes diferentes y que soporta presión ejercida por puertas o ventanas.

3.1.1.Geometría

La forma de la lupa como se describió anteriormente es plano convexa, a continuación se muestra la figura ilustrativa de la lupa formada por el contenedor y la tapa. Ver la figura 25 y figura 26.

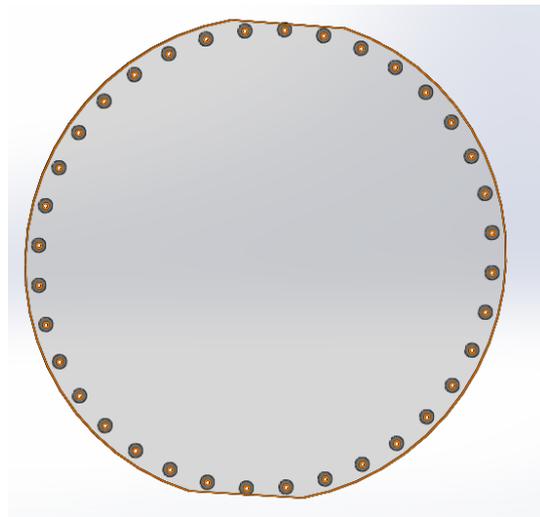


Fig. 25. Vista superior (Tapa) del concentrador

Las dimensiones exactas para la construcción se muestran al final en los anexos.



Fig. 26. Vista lateral rotada del concentrador

3.1.2. Aislamiento

El aislamiento del agua en el interior consta de dos partes, el número de pernos para garantizar estanqueidad, y el tipo de empaque

3.1.2.1. Número de Pernos

Este paraboloides de agua estará contenido en una lente de acrílico la cual se compone de una tapa y un fondo. Para la unión de tapa y fondo se emplea una junta a tracción ya que ni la soldadura ni la pega son viables para este material.

Si bien no se desea que esta unión sea desmontable se escogen pernos debido a su gran versatilidad en el mercado. Y se comienza con pernos M10 que son los más comunes en el mercado.

Para que tengan una distancia prudencial de al menos un centímetro con los bordes el diámetro de ubicación sería:

$$D_b = 1\text{m} + 0,015\text{m} = 1,015\text{ m} = 1015\text{ mm}$$

La recomendación para la distribución de pernos dice que

$$3 \leq \frac{\pi * D_b}{N * d} \leq 6 \quad (3.1)$$

Donde

D_b El diámetro de base de donde van ubicados; ***N*** el número total de pernos y ***d*** el diámetro de los pernos.

Entonces el mínimo número de pernos sería

$$N = \frac{\pi * Db}{6 * d}$$

$$N = \frac{\pi * 1015}{6 * 10} = 53,14 = 54 \text{ pernos}$$

Este valor parece estar demasiado alto por lo que se cambió a pernos M16. Entonces se aumenta también el diámetro de base
 $Db = 1\text{ m} + 0,03\text{ m} = 1,03\text{ m} = 1030\text{ mm}$

$$N = \frac{\pi * 1030}{6 * 16} = 33,7 = 34 \text{ pernos}$$

Y para tener una distribución más uniforme se emplean 36 pernos, es decir a 10° cada perno

$$N = 36 \text{ pernos}$$

3.1.2.2. Tipos de arandelas

Para la selección de las arandelas se tomó en cuenta el material, debido a que el material de acrílico del cual está hecho el concentrador, las arandelas no pueden ser metálicas en vista que al aplicarle torque para su ajuste las fracturarían, motivo por el cual se eligió duralón como material para las arandelas.

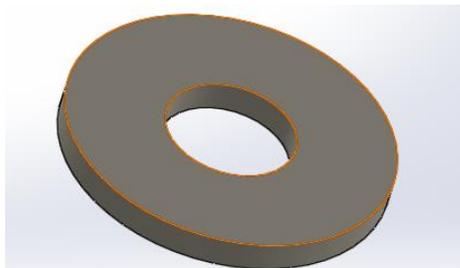


Fig. 27 Simulación de un empaque de duralón

3.1.3. Tipo de empaque

Un empaque o sello mecánico es un dispositivo que permite unir sistemas o mecanismos, evitando la fuga de fluidos, conteniendo la presión, o no permitiendo el ingreso de contaminación.

Existen diversos tipos de empaques en el mercado, los cuales dependen del tipo de servicio, a altas temperaturas presiones y demás. El tipo de empaque que se utilizo es el existente en los automóviles para evitar que el agua atraviese por las ventanas, esto debido a su bajo costo y su fácil manipulación y moldeo. En la figura 28 se puede observar el mismo.

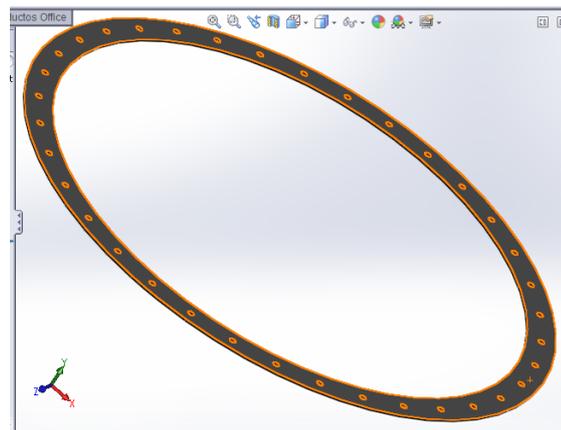


Fig. 28 Simulación de la forma del empaque

3.2. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DEL CONCENTRADOR

Esta estructura es la encargada de soportar el peso de todo el concentrador y de permitirle tener movimiento en dos ejes de rotación. Va a estar dividida en las siguientes subpartes:

3.2.1. Estructura de Sujeción

Una vez se ha definido la geometría exacta del fotohidroconversor es necesario fijarlo en una estructura que le permita tener el movimiento en el eje de rotación. La estructura debe soportar todo el peso de agua, pernos y demás elementos en el concentrador, evitar que esta se deslice de su superficie cuando se encuentre rotada en sus eje y adicionalmente debe ser lo más liviana posible para que, el aumento de la inercia a vencer por los motores, no sea excesivo.

3.2.1.1. Geometría

Mientras mayor sea la superficie en contacto con los pernos, menor será el esfuerzo de aplastamiento que se genere en la estructura de sujeción, es decir el material sufrirá menos esfuerzo para sostener el peso del concentrador, por lo cual se recomendaría una superficie circular plana en la cual todos los pernos se encuentren sostenidos entre 2 placas en forma de anillo plano.

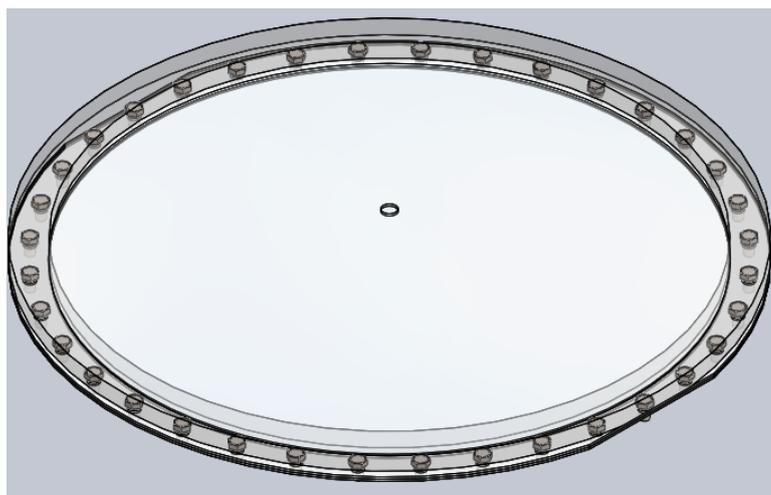


Fig. 29. Estructura sujeta por 2 anillos planos

Este diseño sin embargo presenta una serie de problemas en su construcción:

- **Peso:** Mediante Software CAD, CAE comercial, se calcula que para una estructura de esas dimensiones con un espesor de 2 cms, se tiene un peso de 31,57 kg por cada anillo, lo cual es un peso excesivo para ser transportado con facilidad, es por esto que no se recomienda utilizar un material macizo sino un material hueco, que mantenga la superficie de contacto pero reduzca el peso innecesario.

En la figura 30 se observa el dato del peso calculado.

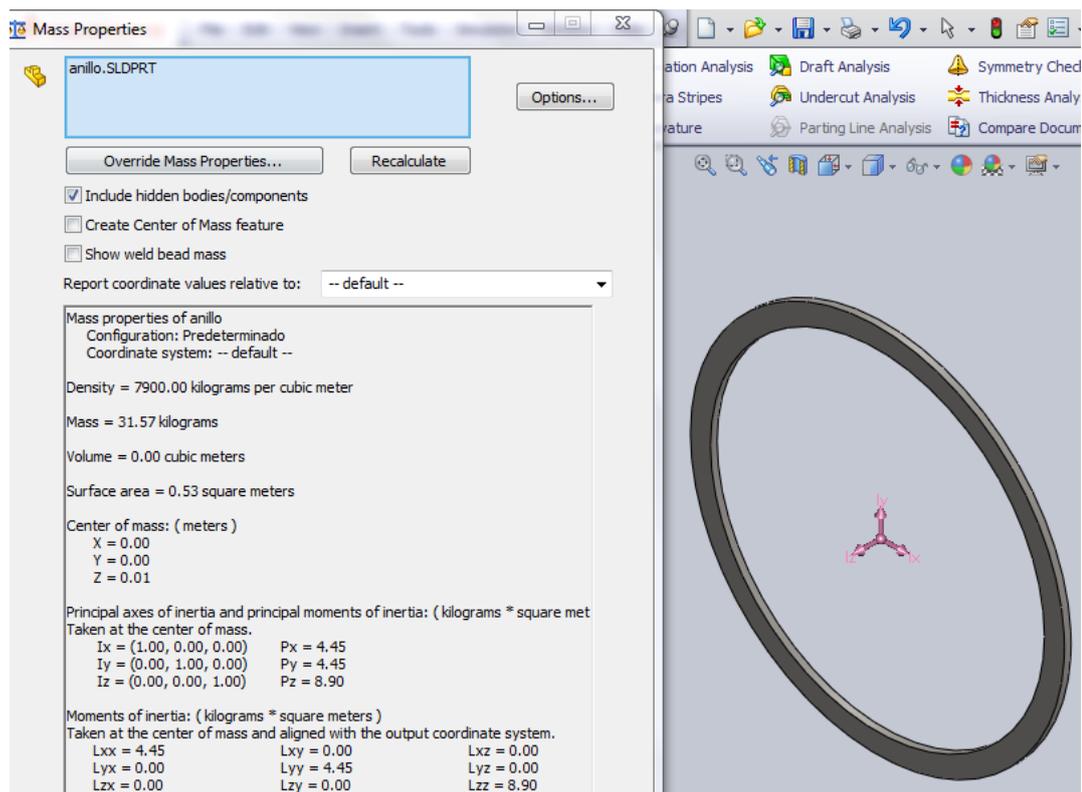


Fig. 30. Peso estructura anillo plano

- Fabricación: Para su fabricación se debería doblar el acero hueco en forma circular, el cual es un proceso que no se realiza en perfiles cuadrados, sino solo en varillas.
- Si se realiza en varillas circulares, tubos, si bien corrige el peso y la construcción, pierde la característica de área de contacto que se buscaba y dificulta el poder equilibrarla adecuadamente en su eje de rotación.

Por estas razones se decidió optar por una geometría más simple en su construcción de tal forma que se construya con perfiles cuadrados de acero, los cuales tienen caras planas en las que se apoyen los pernos y son livianos debido a que son huecos en su interior.

La geometría más simple de construir es un cuadrado circunscrito en la cual los pernos queden sujetos entre las 2 áreas de los perfiles cuadrados, como se ve en la figura 31, sin embargo esta geometría no sujeta muchos pernos y la mayoría de su área no realiza ninguna función, por lo que se debe usar una geometría de mayor número de lados.

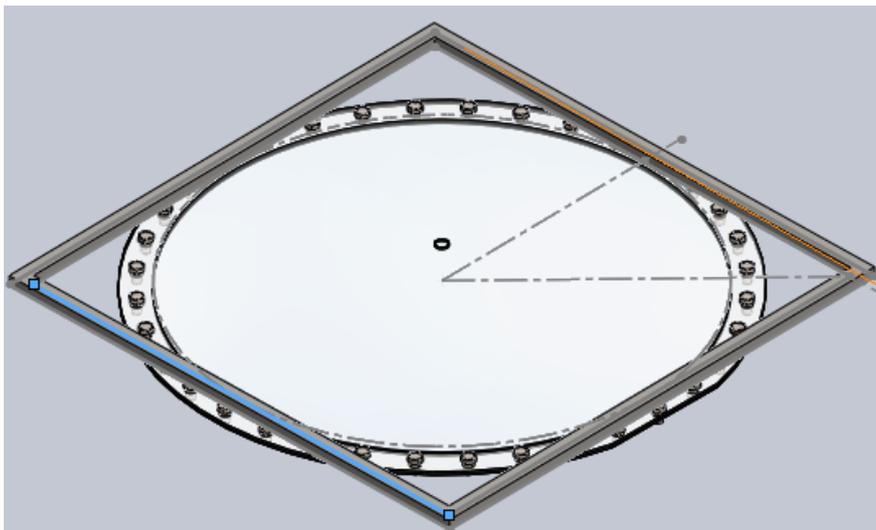


Fig. 31. Estructura sujeta por 2 prismas cuadrados

Un número de lados par ayuda a ubicar los ejes de rotación, por lo que 5, 7 o 9 lados quedan descartados, y se puede intentar con 6,8 ó 10 lados.

Con 6 lados se observa que el área de contacto mejora bastante respecto al cuadrado, pero aún existen pernos sin contacto con ninguna superficie. Esto se puede observar en la figura 32.

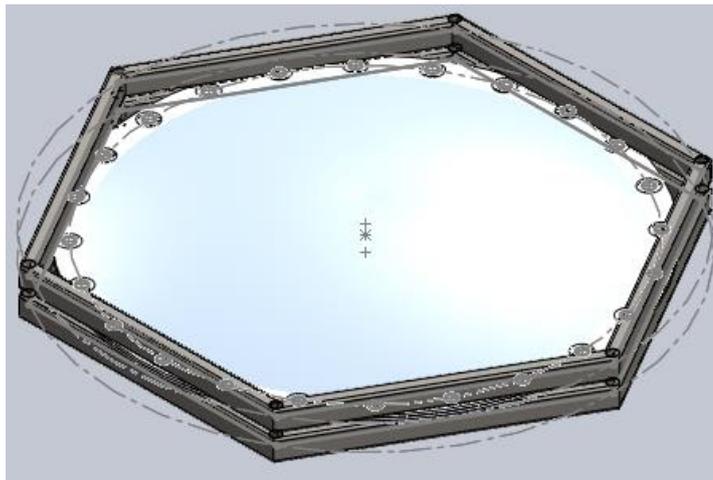


Fig. 32. Estructura sujeta por 2 prismas hexagonales

Con 8 lados se observa en la figura 33 que aumenta el área de contacto ya que la mayoría de pernos se encuentran entre las 2 superficies, y adicionalmente presenta la ventaja de la facilidad de ubicación de los 2 ejes de rotación, es por esto que se escoge esta como la mejor opción.

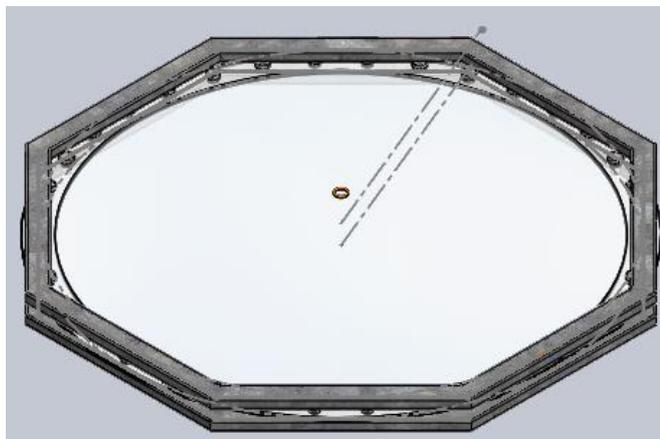


Fig. 33. Estructura sujeta por 2 prismas octogonales.

3.2.1.2. Material

Ahora bien una vez que se ha determinado la geometría deseada es necesario determinar el material a usarse. Como se conoce que esto va a estar a la intemperie es preferible utilizar directamente un acero inoxidable o un acero galvanizado para no tener que darle un acabado superficial después.

De los catálogos de tubos cuadrados en acero galvanizado, se debe escoger uno que posea la suficiente área para que la mayoría de pernos queden sujetos en su superficie. Como ya se conoce el diámetro de los pernos, M10 entonces se puede mantener 10 mm a cada lado para que tenga suficiente espacio a ambos lados al momento de ubicarlo con sus ejes respecto al centro de gravedad del concentrador, con lo que se tendría un mínimo de 30mm de largo.



DIMENSIONES			AREA		EJES X-X			EJES Y-Y		
A mm	B mm	ESPESOR mm	PESO Kg/m	AREA cm ²	I cm ⁴	W cm ³	I cm ⁴	W cm ³	I cm ⁴	W cm ³
20	40	1,2	1,09	1,32	2,61	1,30	1,12	0,88	0,88	0,83
20	40	1,5	1,35	1,65	3,26	1,63	1,40	1,09	1,09	0,81
20	40	2,0	1,78	2,14	4,04	2,02	1,37	1,33	1,33	0,79
25	50	1,5	1,71	2,10	6,39	2,56	1,74	2,19	1,75	1,02
25	50	2,0	2,25	2,74	8,37	3,35	1,75	2,80	2,24	1,01
25	50	3,0	3,30	4,14	12,56	5,02	1,74	3,99	3,19	0,99
30	50	1,5	1,88	2,25	7,27	2,91	1,80	3,32	2,21	1,21
30	50	2,0	2,41	2,94	9,52	3,81	1,80	4,28	2,85	1,21
30	50	3,0	3,30	4,21	12,78	5,11	1,74	5,66	3,77	1,16
30	70	2,0	3,03	3,74	22,20	6,34	2,44	5,85	3,90	1,25
30	70	3,0	4,48	5,41	30,50	8,71	2,37	7,84	5,23	1,20
40	60	1,5	2,29	2,91	14,90	4,97	2,26	7,94	3,97	1,65
40	60	2,0	3,03	3,74	18,08	6,13	2,22	9,81	4,90	1,62
40	60	3,0	4,48	5,41	25,31	8,44	2,16	13,37	6,69	1,57
30	70	1,5	2,34	2,91	18,08	5,17	2,49	4,76	3,17	1,28
30	70	2,0	2,93	3,74	22,20	6,34	2,44	5,85	3,90	1,25
30	70	3,0	4,25	5,41	30,50	8,71	2,37	7,84	5,23	1,20
40	80	1,5	2,76	3,74	31,75	7,94	2,91	10,77	5,39	1,70
40	80	2,0	3,66	4,54	37,32	9,33	2,87	12,70	6,35	1,67
40	80	3,0	5,42	6,61	52,16	13,04	2,81	17,49	8,75	1,63
50	100	2,0	4,52	5,74	74,94	14,99	3,61	25,65	10,26	2,11
50	100	3,0	6,71	8,41	106,34	21,27	3,56	35,97	14,39	2,07
50	150	2,0	6,17	7,74	207,45	27,86	5,18	37,17	14,87	2,19
50	150	3,0	9,17	11,41	298,35	39,78	5,11	52,54	21,02	2,15

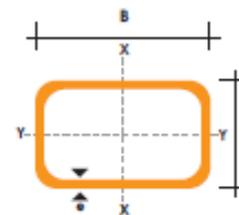


Fig. 34. Catálogo Tubo Estructural Rectangular. Catálogo de Acero

Por seguridad se escoge un tubo cuadrado de 40X20X2 es decir que su sección transversal posee 40 mm de largo por 20 mm de alto x 1.5 mm de espesor, el cual es el tubo de acero más comercial y fácil de adquirir y reemplazar.

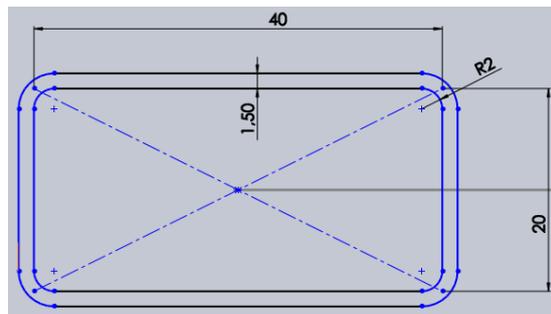


Fig. 35. Sección Tubo cuadrado acero galvanizado

Entonces se verifica que el peso no sea excesivo, y que sea capaz de soportar el peso del concentrador en su superficie.

3.2.1.3. Simulación Software

Mediante simulación en Software CAD, CAE comercial se puede comprobar que el peso de cada octógono es de 6,41 Kg, lo cual es un valor aceptable.

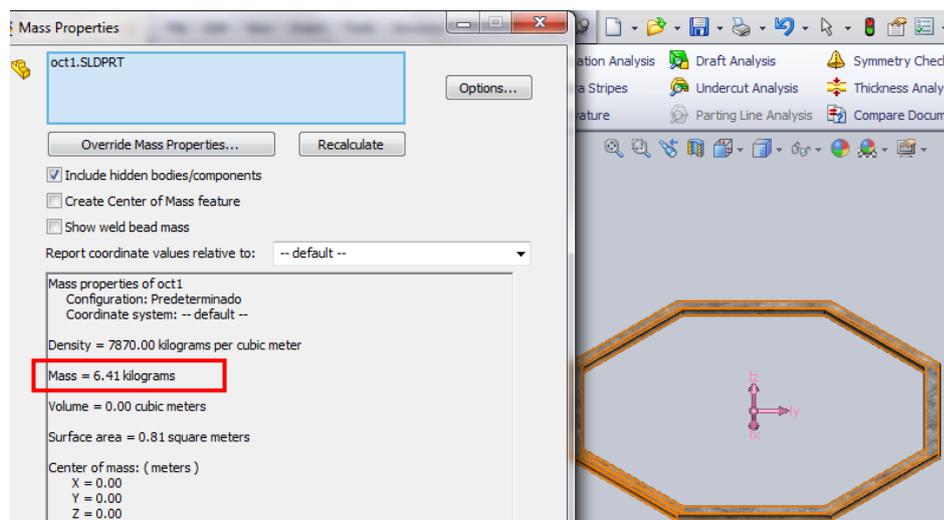


Fig. 36. Simulación Octógono SW.

Ahora es necesario conocer la carga debido al peso del concentrador, una vez este se encuentra completamente ensamblado, es decir una vez puesto empaque, pernos de sujeción y arandelas. Estos valores se observan en las figuras 36 y 37.

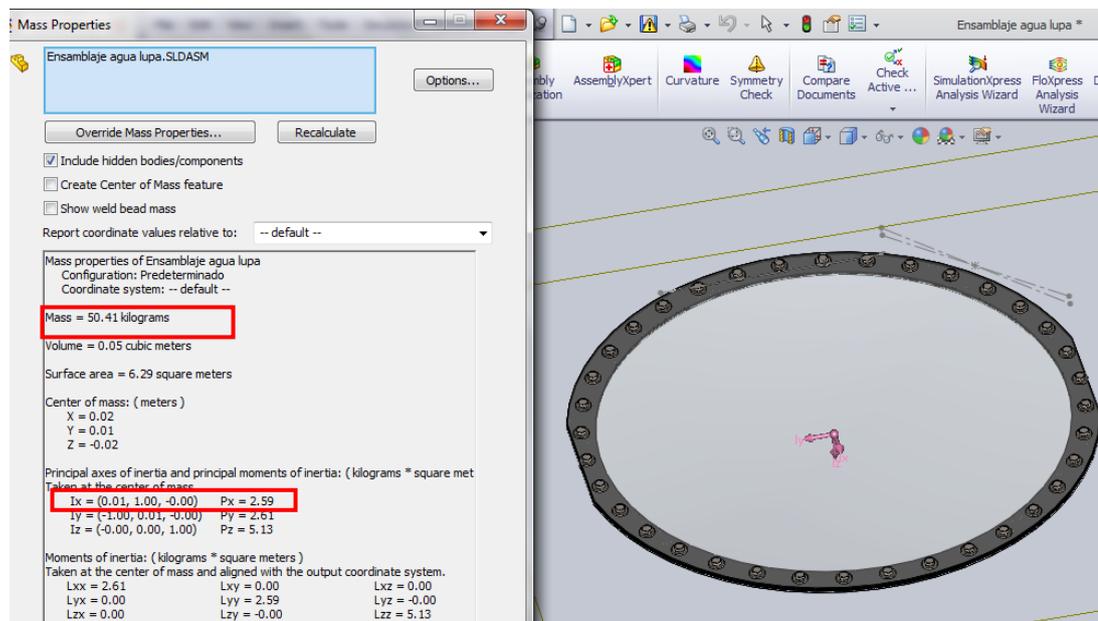


Fig. 37. Simulación SW. Concentrador

Ahí se observa que el peso del concentrador es de 50,41 kg el cual es la carga que debe ser soportada por los octógonos de sujeción. También se conoce el valor de la inercia en el eje de rotación el cual será útil para determinar el torque necesario.

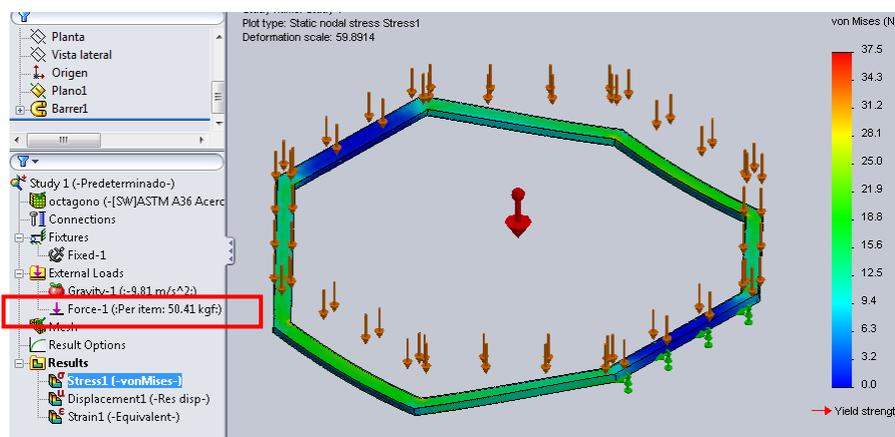


Fig. 38. Análisis Estático de Esfuerzos en Estructura

Con esa información se realiza un estudio estático en solid works con el peso del concentrador para determinar si las dimensiones del material mantienen un Factor de seguridad adecuado, el cual vendría dado por:

$$F.S = \frac{Sy}{\sigma_{M\acute{a}x}} \quad (3.2)$$

$$F.S = \frac{250}{37,5} = 6,666$$

El cual es muy superior a 1, por lo que es adecuado y se encuentra sobredimensionado.

Finalmente se comprueba también la deformación debido a la carga la cual es menor a 1.9 mm.

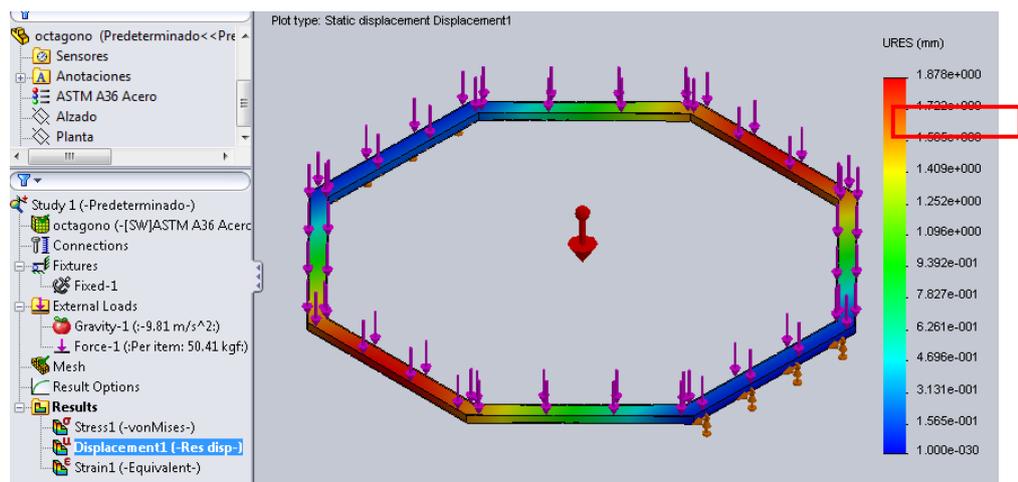


Fig. 39. Análisis Estático de Deflexión en Estructura

Si se conoce que el largo de los brazos en promedio es de:

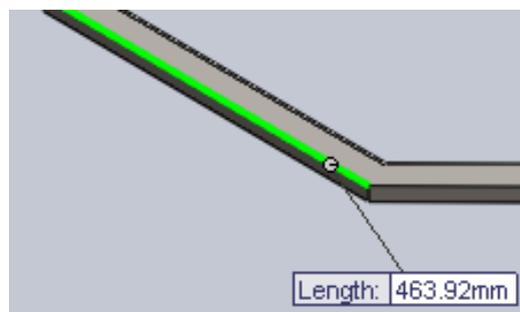


Fig. 40. Medida Promedio Brazo Octógono

Entonces se puede calcular el porcentaje de desviación.

$$Desv \% = \frac{1,878}{463,92} * 100 = 0,4048 \%$$

Que como se observa es menor al 0,5% por lo cual no es un valor considerable.

3.2.2. Diseño Ejes de Rotación

Es necesario que el concentrador posea movimientos en 2 grados de libertad, por lo que la manera más sencilla de conseguirlo es mediante 2 ejes perpendiculares entre sí.

3.2.2.1. Acople Eje-Octógono

Los acoples normalmente permiten que dos ejes de diferente diámetro giren solidariamente, manteniendo un mismo eje de rotación, sin embargo en este caso lo que se necesita es que el movimiento rotario del eje, se traslade a ambos octógonos de soporte. Por tanto se va a unir ambos octógonos mediante una placa y dicha placa unida al eje. Las dimensiones de esta placa vienen dadas por el espacio disponible, una vez colocado el Fotohidroconvertor entre las sujeciones, el cual es:

- Distancia borde- fotohidroconvertor: 15 mm.
- Distancia entre sujeciones: 60 mm.
- Con lo cual queda solamente el largo por definir, y se propone también de 60 mm.

Para elementos que solo se van a montar una sola vez y no deben ser desmontados normalmente se utilizan juntas soldadas, lo cual se aplica en

este caso con la condición de que no pueden estar soldados los 3 elementos ya que de tal forma sería imposible separar el fotohidroconversor de las sujeciones. Por tanto se van a usar juntas soldadas entre el eje-placa y placa- octógono inferior, pero para placa-octógono superior, se van a usar juntas a tracción es decir pernos, de tal forma que el octógono superior se pueda remover como una tapa adicional. Entonces la longitud de 60 mm no es suficiente para poder ubicar pernos. Si se dispone de 15 mm de ancho lo recomendable son pernos M8 para que el agujero no sea muy superior a la mitad del área. Con pernos M8 se necesita al menos 1 cm más a cada lado y otro 1 cm más para que los agujeros no queden en el borde y tengan un área de contacto adecuado, con lo que la longitud mínima es de 10cm.

Finalmente se escoge:

- Largo placa: 120 mm.

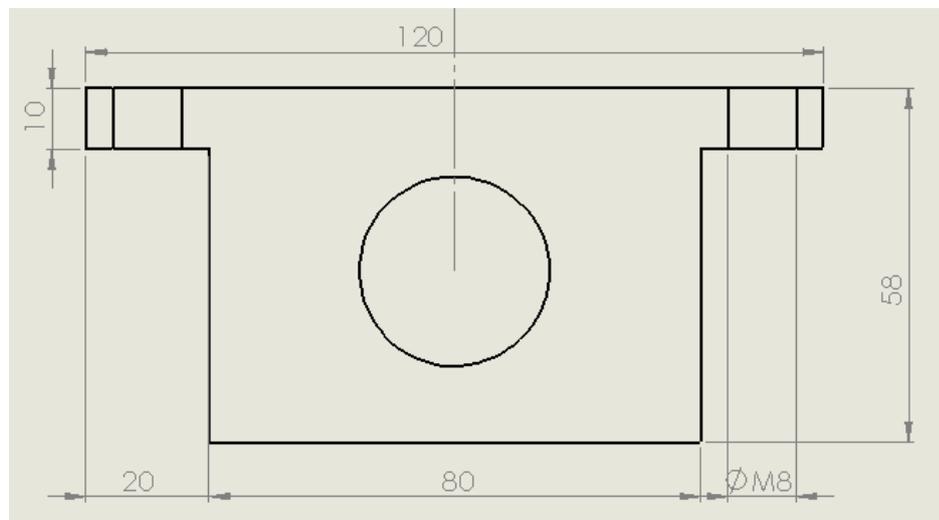


Fig. 41. Esquema Placa de Acople

3.2.2.2. Diseño del Eje Interior

1) Diseño Geométrico: Forma del eje

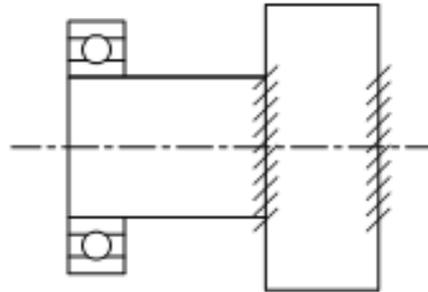


Fig. 42. Diseño Geométrico

2) Diseño Mecánico

DCL



Fig. 43. Diagrama de Cuerpo Libre Eje

$$\sum F_y = 0$$

$$A_y = B_y = W_L = 52 \text{ Kg} \approx 510 \text{ N}$$

$$\sum M_A = 0$$

$$M_A = B_y * d = W_L * d = 510 \text{ N} * 35 \text{ mm} = 17\,850 \text{ Nmm} = 17,85 \text{ Nm}$$

$$T_B = I_{rot} * \alpha \quad (3.3)$$

$$T_B = I_{rot} * \alpha = 2,61 \text{ Kg m}^2 * 1 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2} = 2,61 \text{ Nm}$$

Calculo del diámetro mínimo del eje

Flexión

$$\sigma_b = \frac{M * y}{I} \quad (3.4)$$

$$\sigma_b = \frac{M * y}{I} = \frac{32 * M}{\pi * D^3} = \frac{32 * 17\,850}{\pi * D^3}$$

$$\sigma_b = \frac{181\,818,607}{D^3}$$

Torque

$$\tau_b = \frac{T * \rho}{J} \quad (3.5)$$

$$\tau_b = \frac{T * \rho}{J} = \frac{16 * T}{\pi * D^3} = \frac{16 * 2\,610}{\pi * D^3}$$

$$\tau_b = \frac{13\,292,62}{D^3}$$

Aplicando teoría de fallas por esfuerzo cortante máximo

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_b^2 + 4(\tau_b)^2} \quad (3.6)$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\left(\frac{181\,818,607}{D^3}\right)^2 + 4 * \left(\frac{13\,292,62}{D^3}\right)^2}$$

$$\sigma_{eq} = \frac{183\,751,955}{D^3}$$

Esto se debe relacionar con las propiedades mecánicas del material.

Comercialmente los aceros de transmisión en Ecuador se fabrican de Acero AISI 1018, el cual posee las siguientes características:

Tabla A-20

Resistencias determinísticas mínimas a la tensión y a la fluencia ASTM de algunos aceros laminados en caliente (HR) y estirados en frío (CD). [Las resistencias listadas son valores ASTM mínimos estimados en el intervalo de tamaños de 18 a 32 mm ($\frac{3}{4}$ a $1\frac{1}{4}$ pulg.). Estas resistencias resultan adecuadas para usarse con el factor de diseño definido en la sección 1-10, a condición que los materiales se ajusten a los requisitos ASTM A6 o A568 o que se requieran en las especificaciones de compra. Recuerde que un sistema de numeración no es una especificación.] Fuente: 1986 SAE Handbook, p. 2.15.

1	2	3	4	5	6	7	8
JNS núm.	SAE y/o AISI núm.	Procesamiento	Resistencia a la tensión, MPa (kpsi)	Resistencia a la fluencia, MPa (kpsi)	Elongación en 2 pulg, %	Reducción en área, %	Dureza Brinell
G10060	1006	HR	300 (43)	170 (24)	30	55	86
		CD	330 (48)	280 (41)	20	45	95
G10100	1010	HR	320 (47)	180 (26)	28	50	95
		CD	370 (53)	300 (44)	20	40	105
G10150	1015	HR	340 (50)	190 (27.5)	28	50	101
		CD	390 (56)	320 (47)	18	40	111
G10180	1018	HR	400 (58)	220 (32)	25	50	116
		CD	440 (64)	370 (54)	15	40	126
G10200	1020	HR	380 (55)	210 (30)	25	50	111
		CD	470 (68)	390 (56)	15	40	132

Fig. 44. Tabla A-20. Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley

AISI 1018: $S_y = 220$ MPa ; $S_u = 400$ MPa.

Por tanto:

$$\frac{S_y}{F.S} = \sigma_{eq} \quad (3.7)$$

Se asume un factor de seguridad estático de 4,5. Ya que al hacer el análisis por fatiga este factor se verá reducido a un estimado de 1,5

$$\frac{220}{4,5} = \frac{183\,751,955}{D^3}$$

$$D_{min} = 15,54 \text{ mm}$$

Entonces se debe escoger un diámetro mayor al mínimo el cual puede ser de 20mm o 25mm. Se escoge diámetro de 25mm debido a que el diámetro de 1 pulgada es muy comercial y existen muchos elementos en esta medida, sea rodamientos, chumaceras, cojinetes y demás.

Una vez se ha definido el diámetro del eje y se conocen las medidas de la placa, se debe decidir cómo se las hará moverse solidariamente. Esto se puede lograr mediante chaveta woodrock, sin embargo existe el inconveniente de tener que realizar afectaciones al eje y a la placa, para que ingrese la chaveta y además no existe un largo considerable de la misma, por lo que se opta por otra alternativa, la cual es soldar el eje a la placa. El problema con la soldadura es que las juntas soldadas fallan comúnmente por Esfuerzo Cortante, el cual está presente en este caso debido a la carga de torsión que trasmite el eje hacia la placa.

Para evitar problemas que pudieran darse se sobredimensiona la unión haciéndola doble, es decir que el eje traspase la placa, y este soldado de ambos lados de la placa para que el esfuerzo cortante se compense.

De esta forma el esfuerzo cortante ecuación 3.5 queda:

$$\tau_{torsión} = \frac{T * \rho}{J}$$

En donde: T es el torque máximo, ρ es la distancia del centro de masa al punto de suelda a analizar, que para ejes redondos coincide con el radio del círculo, J es el Momento Polar de Inercia. Este se calcula sumando los momentos de Inercia alrededor de los ejes principales.

$$J_G = \frac{\pi * D^4}{32} = \frac{\pi * 25,4^4}{32} = 40\ 863,42$$

$$\rho = \frac{D}{2} = \frac{25,4}{2} = 12,7$$

$$T = 4\ N * m = 4000\ N * mm$$

$$\tau_{torsión} = \frac{T * \rho}{J} = \frac{4000 * 12,7}{40\ 863,42} = 1,243\ MPa$$

Como se emplea el electrodo más común que es electrodo E6011 tiene la siguiente característica: Resistencia a la tracción: 60Kpsi.

$$S_{S_U} = \frac{2}{3} S_U \quad (3.8)$$

Se reemplazan dichos valores en la fórmula.

$$\frac{2}{3} * 60 \text{ kpsi} * \frac{6.894 \text{ Mpa}}{1 \text{ kpsi}} = 275,76 \text{ MPa}$$

$$\frac{S_{S_U}}{F.S} = \tau_{torsión} \quad (3.9)$$

$$F.S. = \frac{S_{S_U}}{\tau_{torsión}} = \frac{275,76}{1,243} = 221.85$$

3.2.3. Selección de Rodamientos

El uso de cojinetes en Ejes y flechas es fundamental ya que estos permiten disminuir la fricción entre 2 o más elementos que tienen movimiento relativo. Existen dos tipos principales de cojinetes, los Cojinetes de Bola y los Cojinetes de Rodillo, los cuales se diferencian dependiendo de su tipo de aplicación. Los de Bola funcionan a altas velocidades pero baja carga mientras que los de rodillo funcionan a bajas velocidades pero altas cargas. Para nuestra aplicación se necesita del tipo rodillo, ya que la velocidad del sol en el horizonte es un movimiento muy lento, pero el peso del concentrador completamente armado es bastante alto.

El rodamiento de rodillo por sí solo, no es suficiente en este caso ya que se necesita que éste quede sujeto en una posición, y no se desplace de la misma. Por esa razón se emplean chumaceras, los cuales son rodamientos montados que se utilizan para dar apoyo a un eje de rotación. Las

chumaceras se encuentran en varios sistemas de transporte y son a menudo auto-lubricantes. Hay dos tipos básicos de rodamientos de chumacera de acuerdo a su uso. Las chumaceras hidrodinámicas se utilizan a bajas velocidades y, eventualmente, eliminan el contacto de metal a metal ya que la velocidad del dispositivo en el que el rodamiento está montado alcanza su límite. Las chumaceras hidrostáticas mientras tanto no tienen ningún contacto de metal a metal, son capaces de soportar cargas pesadas y a velocidades diferentes y tienen un bajo coeficiente de fricción. La diferencia entre ambos tipos de chumacera se debe a que internamente tienen diferentes tipos de cojinetes. Las hidrodinámicas poseen internamente un cojinete de bolas, mientras que la hidrostáticas tienen internamente cojinete de rodillo. Así se debe entonces emplear una chumacera hidrostática.

Al seleccionar una chumacera, lo primero que se verifica es el tamaño del eje. Después se debe considerar que existen dos formas de fallo diferentes en los cojinetes. El fallo por Picadura que es un tipo de fallo “Dinámico” el cual genera explosiones en la superficie y estas limallas son abrasivos, generando ruido y pérdida de potencia. Mientras el segundo tipo de fallo es por Deformación el cual se da cuando no se utiliza el equipo o cuando la velocidad de rotación es menor a 10RPMs, en donde esta se deforma la circunferencia haciéndose ovalada y se puede atascar. Como la velocidad es baja y la carga es alta se considera el fallo por deformación mucho más importante y significativo que el de picadura. Para el fallo estático se utiliza la siguiente fórmula

$$P_o = X_o * F_r + Y_o * F_a$$

(3. 10)

Donde:

Po es la carga equivalente, Xo y Yo son coeficientes que dependen del tipo de aplicación. Fr es la fuerza Radial, Fa es la fuerza axial.

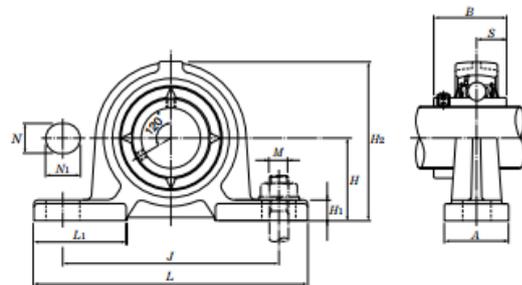
Como no se tiene carga axial debido a la rotación de los elementos entonces se conoce que toda la carga va a ser producto del peso del concentrador y se puede cambiar la fórmula a:

$$P_o = X_o * Fr = 1 * W_{concentrador} \quad (3.11)$$

$$P_o = 50,41 \text{ Kg} * 9,81 \frac{m}{s^2} = 494,52 \text{ N}$$

Con este dato se compara con un catálogo de cojinetes de NTN.

Pillow block unit
UCPE type
Cylindrical bore with set screw



Shaft dia. mm	Unit number	Bearing number	Housing number	Nominal dimensions mm										Bolt size	Basic load ratings		Mass of unit kg	
				H	L	J	A	N	N ₁	H ₁	H ₂	L ₁	B		S	C _r		C _{0r}
12	UCPE201	UC201D1	PE203	30.2	120	95	30	12	14	9	61	42	31	12.7	M10	12.8	6.65	0.5
15	UCPE202	UC202D1	PE203	30.2	120	95	30	12	14	9	61	42	31	12.7	M10	12.8	6.65	0.5
17	UCPE203	UC203D1	PE203	30.2	120	95	30	12	14	9	61	42	31	12.7	M10	12.8	6.65	0.5
20	UCPE204	UC204D1	PE204	33.3	120	95	30	12	14	9	64	42	31	12.7	M10	12.8	6.65	0.5
25	UCPE205	UC205D1	PE205	36.5	130	105	30	12	14	10	70	42	34.1	14.3	M10	14.0	7.85	0.5
30	UCPE206	UC206D1	PE206	42.9	155	121	36	17	20	11	82	54	38.1	15.9	M14	19.5	11.3	0.9
35	UCPE207	UC207D1	PE207	47.6	161	127	38	17	20	12	92	54	42.9	17.5	M14	25.7	15.3	1.1
40	UCPE208	UC208D1	PE208	49.2	171	137	40	17	20	12	98	52	49.2	19	M14	29.1	17.8	1.4
45	UCPE209	UC209D1	PE209	54	180	146	40	17	20	13	105	60	49.2	19	M14	32.5	20.4	1.5
50	UCPE210	UC210D1	PE210	57.2	195	159	45	19	22	14	114	65	51.6	19	M16	35.0	23.2	1.8
55	UCPE211	UC211D1	PE211	63.5	207	171	45	19	22	15	125	65	55.6	22.2	M16	43.5	29.2	2.7
60	UCPE212	UC212D1	PE212	69.8	220	184	55	19	22	17	137	70	65.1	25.4	M16	52.5	36.0	3.7

① If relubricatable type is needed, please order with suffix "D1". (Ex:UCPE201D1)

Fig. 45. Bearing Units with Ductile Cast Iron Housing

La carga estática que soporta la chumacera UCPE205 es de 7,85KN

$$C_o = F. Servicio * P_o \quad (3.12)$$

$$F. Servicio = \frac{C_o}{P_o} = \frac{7850 \text{ N}}{494,5221 \text{ N}} = 15,87$$

El cual es un Factor de servicio muy alto que garantiza un funcionamiento adecuado.

3.2.4. Diseño del Eje Exterior

Debido a que los cálculos para el Eje interior se encuentran muy sobredimensionados, se van a emplear dichas medidas como punto de partida y se comprobará si el esfuerzo resultante no supera las condiciones de seguridad.

3.2.5. Octógono Exterior

Para el par de octógonos de sujeción interna se observa que el factor de seguridad es de 6,6 por lo que este podría emplearse para el octógono exterior pero en este caso la carga no va a estar distribuida a lo largo de las caras, sino concentrada en la parte inferior del par de chumaceras en los ejes. Por tal motivo se aumenta el espesor interno al siguiente espesor en el catálogo que es de 2mm de la siguiente forma:

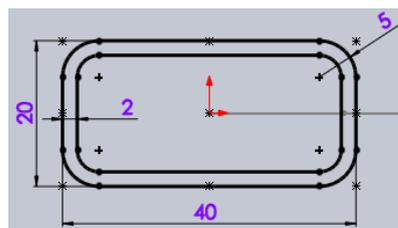


Fig. 46. Sección Tubo cuadrado acero galvanizado

Con este tubo y las dimensiones de la chumacera es necesario realizar un nuevo estudio, considerando el peso del concentrador, los octógonos, los pernos de sujeción y las chumaceras.

Modelando todos estos elementos en Software CAD, CAE comercial se conoce el valor de esta carga.

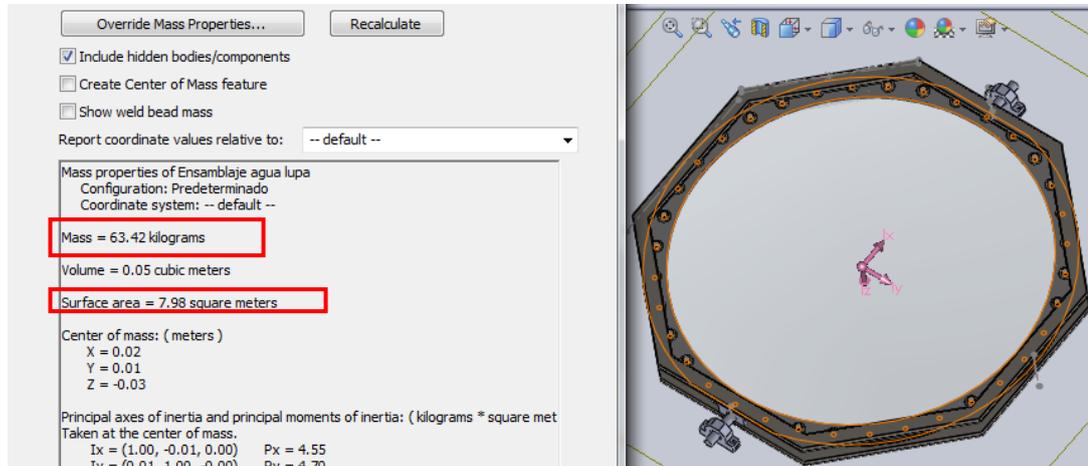


Fig. 47. Simulación Concentrador con Sujeción.

Con este valor de carga se procede a realizar el análisis de esfuerzo en el octógono exterior como se ve en la figura .

$$F.S = \frac{Sy}{\sigma_{M\acute{a}x}}$$

$$F.S = \frac{250}{134,6} = 1,857$$

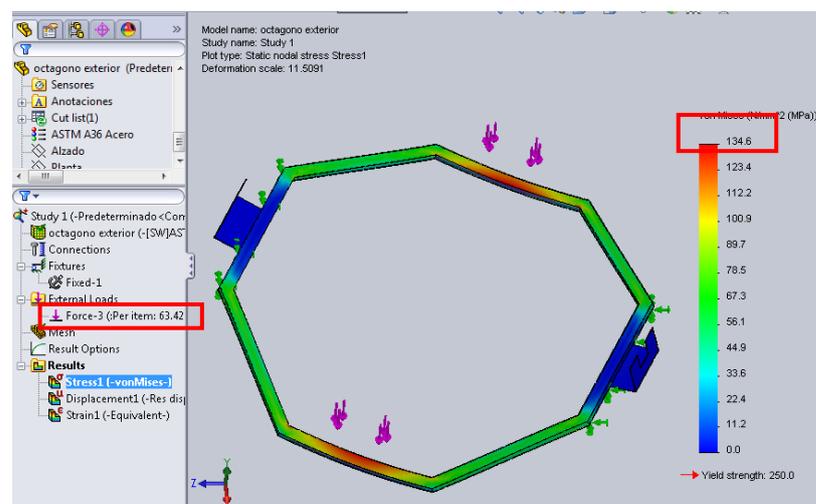


Fig. 48. Análisis Estático Octógono Exterior.

El Factor de seguridad obtenido es mayor a 1 con lo que se comprueba que la estructura propuesta puede soportar el peso al que va a estar sometida.

3.2.6. Eje Exterior

De la misma forma que con el octógono, se va a considerar el eje anterior como punto de partida ya que este se encontraba muy sobredimensionado, y se comprueba que sea capaz de soportar la carga DCL:



Fig. 49. Diagrama de Cuerpo Libre Eje

Fuente: (Tumbaco, P; Barrionuevo, C; 2014)

$$\sum F_y = 0$$

$$A_y = B_y = W_L = 63,42 \text{ Kg} \approx 622 \text{ N}$$

$$\sum M_A = 0$$

$$M_A = B_y * d = W_L * d = 622 \text{ N} * 35 \text{ mm} = 21\,775 \text{ Nmm} = 21,775 \text{ Nm}$$

$$T_B = I_{rot} * \alpha = 4,7 \text{ Kg m}^2 * 1 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2} = 4,7 \text{ Nm}$$

Calculo del diámetro mínimo del eje

Flexión

$$\sigma_b = \frac{M * y}{I} = \frac{32 * M}{\pi * D^3} = \frac{32 * 21\,775}{\pi * 25,4^3}$$

$$\sigma_b = 13,535 \text{ MPa}$$

Torque

$$\tau_b = \frac{T * \rho}{J} = \frac{16 * T}{\pi * D^3} = \frac{16 * 4\,700}{\pi * 25,4^3}$$

$$\tau_b = 1,461 \text{ MPa}$$

Aplicando teoría de fallas por esfuerzo cortante máximo

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_b^2 + 4(\tau_b)^2}$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{13,535^2 + 4 * 1,461^2}$$

$$\sigma_{eq} = 13,847 \text{ MPa}$$

$$\frac{S_y}{F.S} = \sigma_{eq}$$

$$F.S = \frac{S_y}{\sigma_{eq}} = \frac{220}{13,874} = 15,88$$

En fatiga el factor de seguridad, se ve reducido aproximadamente 3 veces, debido a las cargas alternantes que en este caso si están presentes, sin embargo el Factor de Seguridad Estático es tan alto, que se tiene la confiabilidad necesaria con ese diámetro de eje.

3.3. MOVIMIENTO

Una vez se tiene toda la estructura de sujeción, la cual le permite girar libremente a lo largo de 2 ejes de rotación, se necesita determinar cómo se va a realizar ese movimiento de forma controlada, para que el sistema de seguimiento solar, pueda alcanzar la posición adecuada. Se evalúan las

formas comercialmente usadas de conseguir un movimiento rotatorio a lo largo de un eje, para lo cual se determinaron las siguientes alternativas.

3.3.1. Alternativas

1. Cilindros Neumáticos: Poseen movimiento lineal, el cual es pilotado mediante válvulas neumáticas, permiten que un cilindro se mueva axialmente en ambos sentidos a lo largo de una carrera definida. Colocando el vástago del pistón de forma que quede perpendicular a una cara del octógono, si esta cara es paralela a un eje, el movimiento lineal del cilindro se transforma en rotatorio a lo largo de ese eje.

Ventajas:

- Fácil adquisición.
- Mantenimiento Sencillo.

Desventajas:

- Requiere de un compresor de aire para funcionar.
- El compresor de aire tiene baja eficiencia.
- No se puede controlar con precisión la posición.
- No soporta carga en el vástago.
- Limitada ventaja mecánica. Es decir que necesita estructura adicional ya que su propia estructura no le permite girar en todos los ángulos.

2. Cilindros Hidráulicos: Poseen movimiento lineal y al igual que los cilindros neumáticos permiten un movimiento axial bidireccional a lo largo de una carrera. La diferencia se encuentra en cómo se produce el movimiento internamente, ya que estos en vez de tener aire utilizan aceite hidráulico que circula para generar desplazamiento. Se coloca de la misma manera que el

cilindro neumático, colocando el vástago perpendicular a una cara paralela al eje de rotación.

Ventajas:

- Control de Posición Preciso.
- Soporta cargas muy altas en el vástago.

Desventajas:

- Alto costo.
- Requiere mantenimiento constante.
- Requiere un depósito de aceite para funcionar.
- Requiere una bomba para circular el aceite.
- Limitada ventaja mecánica. Es decir que necesita estructura adicional ya que su propia estructura no le permite girar en todos los ángulos.

3. Actuadores Lineales: Poseen movimiento lineal al igual que los cilindros neumáticos e hidráulicos. La diferencia con estos radica en que no necesita de un elemento adicional como el aire o el aceite para funcionar, sino que transforma el movimiento de rotación de un motor de corriente continua de baja tensión en movimiento lineal, es decir, los movimientos de empuje y tiro, mediante un engranaje y un eje roscado, incluyendo una tuerca. Se coloca de la misma manera que los cilindros, colocando el vástago perpendicular a una cara paralela a un eje de rotación.

Ventajas:

- Control de Posición Preciso
- Soporta Cargas altas en el vástago.
- Alta eficiencia energética por funcionar con electricidad.
- Mantenimiento casi nulo.

Desventajas:

- Alto Costo
- No se encuentra comercialmente en el Ecuador. Necesita importación.
- Limitada ventaja mecánica. Es decir que necesita estructura adicional ya que su propia estructura no le permite girar en todos los ángulos.

4. Motores: Poseen movimiento rotatorio. Son muy comunes en el mercado debido a que transforman la energía eléctrica en movimiento giratorio en un eje. Existen de diversas velocidades, torques, e incluso funcionamiento ya que existen tanto en corriente continua como en corriente alterna. Se colocan directamente en el eje de rotación y mediante un acople entre el eje del motor y el eje de rotación se consigue que estos giren solidariamente.

Ventajas:

- Muy bajo consumo energético.
- Requiere mantenimiento nulo o casi nulo.
- Muy bajo costo.

Desventajas:

- A altas velocidades es imposible controlar la posición.
- Requiere una caja reductora para controlar la posición.
- Caja reductora si necesita mantenimiento y tiene un costo medio.
- No mantiene la posición de su eje.

5. Piñón - Cremallera: Poseen movimiento lineal. Son similares a los actuadores lineales al utilizar un motor de baja tensión y transformar su movimiento giratorio en lineal, sin embargo se diferencian de estos en la forma de conseguir esa transformación. Los sistemas piñón cremallera, no tienen un eje roscado sino una pieza dentada de iguales características al piñón, es decir módulo y paso circular. Adicionalmente necesita de una guía

sobre la cual desplazarse ya que solo debe tener movimiento a lo largo de un eje. Se colocan de la misma manera que los cilindros y el actuador lineal.

Ventajas:

- Control de Posición Preciso.
- Alta eficiencia energética por funcionar con electricidad.
- Mantenimiento casi nulo.
- Costo medio.

Desventajas:

- No mantiene la posición de la pieza dentada.
- Limitada ventaja mecánica. Es decir que necesita estructura adicional ya que su propia estructura no le permite girar en todos los ángulos.

6. Motoreductores: Poseen movimiento rotatorio. Son motores que incluyen en su fabricación una caja reductora, la cual reduce su velocidad pero le otorga un mayor torque. También existen en corriente continua y alterna. Se colocan de la misma forma que los motores con un acople entre su eje de salida y el eje de rotación.

Ventajas:

- Control de Posición medio o preciso. Depende del reductor interno.
- Es auto bloqueante es decir que mantiene la posición de su eje de salida.
- Alta eficiencia energética por funcionar con electricidad.
- Mantenimiento casi nulo.
- Costo bajo o medio. Depende del reductor interno.

Desventajas:

- Tiene picos de corriente para arrancar.
- El reductor interno debe ser mediante tornillo sin fin - corona.

7. Servomotores: Poseen movimiento rotatorio. Están basados en motores con cajas reductoras al igual que la moto reductora, sin embargo en su fabricación se incluyen muchas otras características, tanto mecánicas como electrónicas. Poseen encoder que le permite conocer el valor del ángulo en que se encuentran y el ángulo a desplazarse. También poseen circuitos limitadores de torque y de corriente dependiendo de la necesidad. Necesitan drivers especiales los cuales se encargan de controlar la posición y velocidad de funcionamiento. Se colocan de la misma forma que los motores y motoredutores mediante un acople entre su eje de salida y el eje de rotación.

Ventajas:

- Control de posición muy preciso. Décimas de grado.
- Alta eficiencia energética por funcionar con electricidad.
- Mantenimiento sencillo.

Desventajas:

- Para mantener la posición debe mantenerse energizado.
- Muy alto costo.
- Requiere de un driver especial para su funcionamiento.

3.3.2. Matriz de Decisión

Para poder determinar la solución óptima en nuestra aplicación es necesario establecer criterios de evaluación, para conocer las ventajas y

desventajas de cada alternativa y poder tomar una decisión más cercana a nuestros requerimientos.

- **Precisión:** Es el requerimiento más importante de todos, ya que si la alternativa de movimiento no es capaz de alcanzar la posición adecuada dentro de un rango establecido, el seguidor solar no puede funcionar adecuadamente y no ayuda a una mejor concentración de radiación debido a pérdidas por reflexión.
- **Posición adecuada:** Una vez que la alternativa de movimiento haya alcanzado la posición adecuada es necesario que se mantenga en dicha posición por un tiempo determinado antes de desplazarse al siguiente punto.
- **Consumo energético:** El consumo energético de la alternativa no puede superar la energía concentrada ya que en vez de una energía renovable implicaría desperdicio energético.
- **Mantenimiento:** Una facilidad de mantenimiento resulta útil para que el equipo pueda trabajar por largas temporadas sin problemas, lo cual es una condición deseada.
- **Costo:** Un menor costo en la alternativa va de acuerdo con el sentido de aplicación de las energías renovables para que puedan ser implementadas.
- **Otros:** Factores importantes de consideración que no hayan sido tomadas antes en cuenta.

Estos criterios de evaluación se los va a ordenar en una matriz de evaluación en la cual cada opción tendrá una variable y un valor determinado el cual se proporcionará según el grado de cumplimiento.

Tabla 6. Criterios a Evaluar en la selección

CRITERIO	VARIABLE	VALOR	CONDICIÓN
Precisión	Pr	30	Mayor Precisión
Posición Adecuada	PA	25	Mantener la posición
Consumo Energético	CE	10	Mayor Eficiencia Energética
Mantenimiento	Mt	10	No requiere mantenimiento
Costo	C	20	Bajo Costo
Otros	Ot	5	No presenta problemas
	Total	100	

Tabla 7. Matriz Morfológica

Alternativa	Criterios de Evaluación de Alternativas						
	Pr	PA	CE	Mt	C	Ot	Total
	30	25	10	10	20	5	100
Cilindro Neumático	0	0	0	5	10	0	15
Cilindro Hidráulico	30	25	0	0	0	0	55
Actuador Lineal	30	25	10	10	5	0	80
Motor	5	0	10	10	20	5	50
Piñón Cremallera	30	0	10	10	5	0	55
Moto reductor	30	25	10	10	15	5	95
Servomotor	30	20	10	10	0	5	75

La mejor alternativa para nuestros requerimientos es un moto reductor, el cual posea internamente un reductor mediante tornillo sin fin - corona.

3.3.3. Selección de Motores

Existen dos tipos de moto reductores: Moto reductores AC, es decir que funcionan con corriente alterna, y son los más comunes en el mercado, y los motoreductores DC es decir de corriente continua, los cuales no son tan comunes y se fabrican bajo pedido. Sin embargo como se verá más adelante el circuito de control necesario para poder, tanto invertir el giro, como controlar la potencia del motor, es mucho más sencillo, económico y más confiable en motores de corriente continua, en comparación al circuito necesario para realizar estas acciones en corriente alterna. Por tal motivo se escogió este tipo de motores, y realizan los cálculos correspondientes.

3.3.3.1. Cálculo de Velocidad

El movimiento del concentrador viene dado por el seguimiento del sol el cual se descompone en 2 movimientos. Primero el movimiento relativo del sol sobre el horizonte, debido a la rotación de la tierra. Al eje encargado de realizar este movimiento se lo nombrará de ahora en adelante como "Eje Principal". Segundo el movimiento relativo del sol respecto al horizonte, debido a la traslación de la tierra a lo largo del año, con el consecuente cambio del ángulo de declinación que esto produce. Al eje encargado de realizar este movimiento se lo nombrará "Eje secundario".

Eje Principal:

La velocidad de rotación de la tierra es de: 1 Revolución cada 24 horas. Por tanto la velocidad relativa del sol es de:

$$\omega_{sol} = \frac{1rev}{24hrs} * \frac{1hrs}{60min} = 6,944 * 10^{-4} RPMs$$

Esta es una velocidad extremadamente baja a la cual no puede girar un motor, ya que esto implicaría que este prendido todo el tiempo moviéndose muy lentamente, sin embargo esta velocidad sirve para descomponer el movimiento en pequeños movimientos cada cierto tiempo.

Si se propone un tiempo de actualización de 5 minutos, se puede conocer cuál fue el ángulo desplazado.

$$\omega_{sol} = \frac{\theta}{t} \quad (3.13)$$

$$\theta_{desplazado} = \omega_{sol} * t = 6,944 * 10^{-4} \frac{rev}{min} * \frac{360^{\circ}}{1 rev} * 5 min = 1,25^{\circ}$$

Se puede cambiar el tiempo de actualización para que sea de 4 minutos con lo que el ángulo desplazado es de:

$$\theta_{desplazado} = \omega_{sol} * t = 6,944 * 10^{-4} \frac{rev}{min} * \frac{360^{\circ}}{1 rev} * 4 min = 1^{\circ}$$

Ahora bien la velocidad viene dada por:

$$\omega_{eje\ principal} = \frac{\theta_{desplazado}}{t_{corrección}} \quad (3.14)$$

Si se establece un tiempo de corrección de 1 segundo se tiene:

$$\omega_{eje\ principal} = \frac{\theta_{desplazado}}{t_{corrección}} = \frac{1^{\circ}}{1\ seg} * \frac{1\ rev}{360^{\circ}} * \frac{60\ seg}{1\ min} = 0,016\ RPMs$$

Este valor aún resulta muy bajo para un motor, por lo que se debería aumentar el tiempo de actualización o bien reducir el tiempo de corrección.

Aumentando el tiempo de corrección a 15 minutos se tiene que:

$$\theta_{desplazado} = \omega_{sol} * t = 6,944 * 10^{-4} \frac{rev}{min} * \frac{360^{\circ}}{1 rev} * 15 min = 3,75^{\circ}$$

Y bajando el tiempo de actualización a 0,1 segundos se tiene que:

$$\omega_{eje\ principal} = \frac{\theta_{desplazado}}{t_{corrección}} = \frac{3,75^\circ}{0,1\ seg} * \frac{1\ rev}{360^\circ} * \frac{60\ seg}{1\ min} = 6,25\ RPMs$$

Esta va a ser la velocidad máxima del eje principal.

Eje Secundario:

Ahora bien se conoce que el ángulo de declinación en la latitud 0, varía +/- 24° al año por lo que:

$$\omega_{sol} = \frac{\theta}{t} = \frac{48^\circ}{1\ año} * \frac{1\ año}{365\ días} * \frac{1\ día}{24\ hrs} * \frac{1\ hrs}{60\ min} * \frac{1\ rev}{360^\circ} = 2,5367 * 10^{-7}\ RPMs$$

Este valor es más de mil veces más pequeño que el valor del movimiento diario. Por lo cual se necesita una velocidad mucho más baja. Por tal motivo se va a utilizar la misma velocidad que el eje principal como valor máximo para la selección del motor de este eje.

$$\omega_{eje\ secundario} = 6,25\ RPMs$$

3.3.4. Cálculo de Potencia

El segundo factor determinante de un motor viene dado por su potencia. Esta es la que determina el torque máximo que el motor puede generar a la velocidad establecida. Para eso se va a emplear Software CAD, CAE comercial y se realiza un estudio de movimiento.

En este estudio se establece la velocidad de giro del motor, el peso a rotar únicamente de la estructura interna, el eje de rotación y finalmente el ángulo de partida y de llegada.

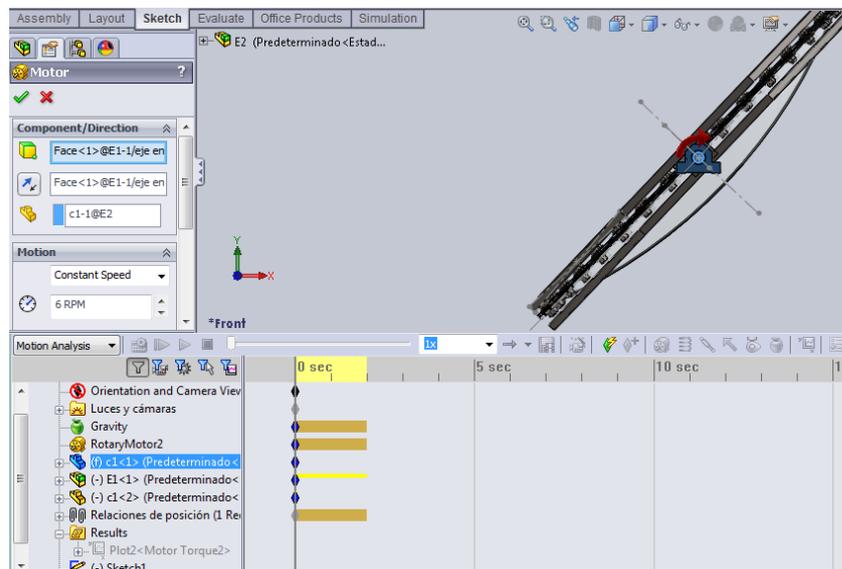


Fig. 50. Estudio de Movimiento Eje Secundario.

Este eje se va a mover desde -24° hasta $+24^{\circ}$ respecto a un eje perpendicular a la tierra, debido a que en esta latitud la declinación del sol se mueve en esos ángulos. Como factor de seguridad se establece un rango de $\pm 35^{\circ}$ con lo cual se asegura una corrección adecuada.

Al correr el estudio se obtiene la gráfica de torque a continuación y el torque máximo que utiliza el motor para girar desde la posición más baja en el eje interior.

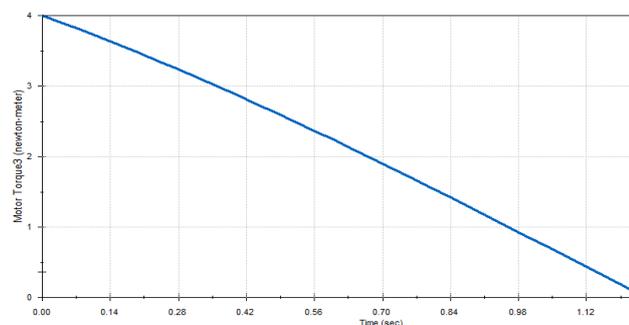


Fig. 51. Gráfico de Torque desarrollado

El valor máximo de torque es de 4 N-m. Este valor aplica en ambos sentidos ya que la carga es simétrica alrededor del eje de rotación.

La potencia viene relacionada con el torque mediante la fórmula:

$$P = T * \omega \quad (3.15)$$

Entonces se encuentra que para el eje interior:

$$P_{eje\ int} = 4\ N * m * 6,25 \frac{rev}{min} * \frac{2\pi\ rad}{1\ rev} * \frac{1\ min}{60\ segs} = 2,618\ W$$

Adicionalmente se debe considerar la carga de viento, ya que al estar a una mayor altura, alcanza velocidades mayores, esta se calcula con la fórmula:

$$F_v = \rho * Q * Vf \quad (3.16)$$

Donde:

F_v es la fuerza del viento, ρ es la densidad del aire, Q es el caudal de aire y Vf es la velocidad del viento.

La densidad del aire es:

$$\rho = 1,00720\ Kg/m^3$$

La velocidad del aire se determina experimentalmente mediante un anemómetro y se encuentra que la velocidad máxima es de:

$$Vf = 14\ m/s$$

Finalmente el caudal de aire en contacto con el concentrador se relaciona mediante la fórmula:

$$Q = A * Vf \quad (3.17)$$

En donde A es el área de contacto. Esta área en el concentrador viene dada por 2 superficies principales: La superficie plana y la superficie convexa. Si bien la superficie convexa tiene un mayor área esta no genera momento en ninguno de los ejes como se observa en la figura 52. En donde el eje de rotación viene marcado con un círculo y una cruz en su centro, y se aprecia que no existe distancia perpendicular sobre la que la fuerza del viento realiza un brazo de palanca, mientras que como se ve en la figura 53.

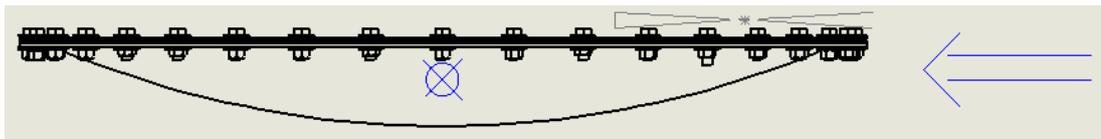


Fig. 52. Esquema Viento sobre Área Convexa

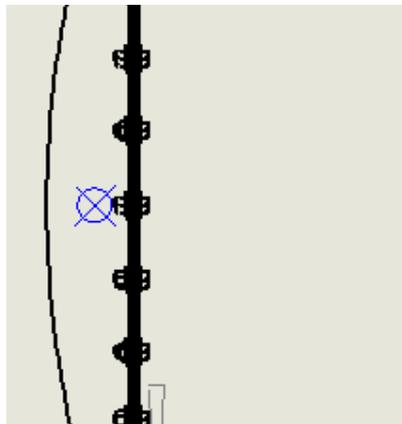


Fig. 53. Esquema Viento sobre Área Plana

La fuerza del viento se aplica sobre un área a una distancia perpendicular, por tal motivo genera un momento en el eje de rotación que debe ser vencido por el motor.

Entonces el área de contacto viene dada por:

$$A = \frac{\left(\pi * \frac{D^2}{4}\right)}{2} = \frac{\left(3,1416 * \frac{1^2}{4}\right)}{2} = 0,3926 \text{ m}^2$$

Entonces el caudal de viento es de:

$$Q = A * Vf = 0,3926 * 14 = 5,497 \text{ m}^3/\text{s}$$

La fuerza de viento es entonces:

$$F_v = \rho * Q * Vf = 1,0072 * 5,497 * 14 = 77,52 \text{ N}$$

Ahora bien esta fuerza al actuar sobre las partes más extremas del concentrador se transforma en momento al actuar sobre la distancia perpendicular, que viene a ser el radio del concentrador.

$$M = F_v * d_{perpendicular} \quad (3.18)$$

$$M = 77,52 * 0,5 = 38,762 \text{ N} * \text{m}$$

La potencia adicional es de:

$$P_{adicional} = M * \omega \quad (3.19)$$

$$P_{adicional} = M * \omega = 38,762 \text{ Nm} * 6,25 \frac{\text{rev}}{\text{min}} * \frac{2\pi \text{ rad}}{1 \text{ rev}} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ segs}} = 25,36 \text{ W}$$

$$P_{total} = P_{eje \text{ int}} + P_{adicional} = 2,618 + 25,36 = 27,978 \text{ W}$$

Para encontrar la potencia nominal del motor se consideran las pérdidas por fricción, uniones y rodamientos, lo que normalmente no supera el 25%.

$$P_{motor} = \frac{P_{total}}{\eta} \quad (3.20)$$

$$P_{motor} = \frac{P_{total}}{\eta} = \frac{27,978}{0,75} = 37,31 \text{ W}$$

Se necesita encontrar un motor de 40W, lo cual es un valor que sí existe en moto reductoras DC. Estos motores pueden ser importados ya que en el Ecuador no se los fabrica, sin embargo se utilizan moto reductores de estas características en los motores de las plumas de los carros. Esto resulta más amigable con el medio ambiente ya que estos motores se venden como chatarra, y así se los puede reutilizar, verificando el buen estado los dientes de los engranes.

Ahora para el eje exterior se va a realizar el mismo procedimiento, comenzando por la simulación en Software CAD, CAE comercial, de la estructura con los ejes de sujeción.

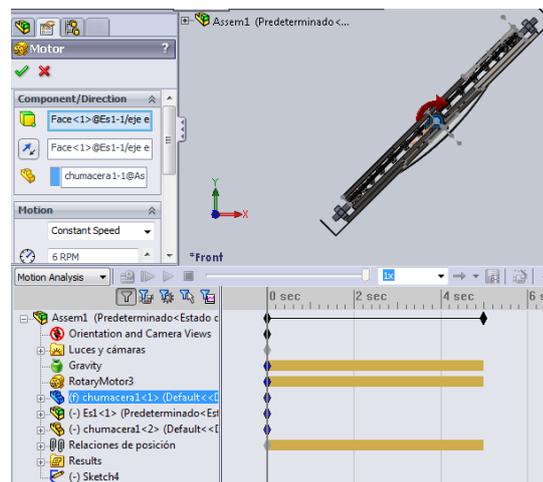


Fig. 54. Estudio de Movimiento Eje Primario

En este estudio se mantiene la misma velocidad de giro del motor, y se considera el peso en toda la estructura, y se ajusta el ángulo de partida y de

llegada. Este eje se va a mover desde -48° hasta $+48^\circ$ respecto a un eje perpendicular a la tierra, debido a que la posición del sol sobre el horizonte avanza 16° por hora, y se considera un rango de actuación de ± 3 horas respecto al medio día, ya que en estas horas se consigue la mayor radiación.

Se corre el nuevo estudio y se obtiene la gráfica de torque a continuación y el torque máximo que utiliza el motor para girar desde la posición más baja en el eje exterior.

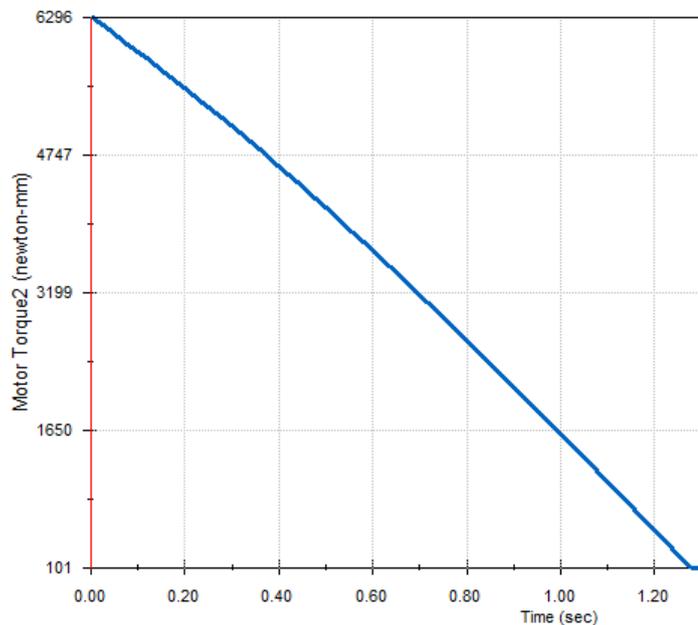


Fig. 55. Gráfico de Torque desarrollado

El valor máximo de torque es de 6 296 N-mm lo cual equivale a decir 6,296N-m. Este valor aplica en ambos sentidos ya que la carga es simétrica alrededor del eje de rotación.

La potencia viene relacionada con el torque mediante la fórmula:

$$P = T * \omega$$

(3. 21)

Entonces se tiene para el eje exterior que:

$$P_{eje\ ext} = 6,296N * m * 6,25 \frac{rev}{min} * \frac{2\pi\ rad}{1\ rev} * \frac{1\ min}{60\ segs} = 4,121\ W$$

A este valor se debe considerar el momento realizado por el la fuerza del viento, el cual es similar al que se había considerado, ya que la mayor área se encuentra en el concentrador, y el área añadida por la estructura de sujeción no es mayor al 10% de esta.

La potencia adicional viene determinada por:

$$P_{adicional} = P * \Delta_{\text{área}} = 25,36 * 1,10 = 27,896\ W$$

$$P_{total} = P_{eje\ int} + P_{adicional} = 4,121 + 27,896 = 32,017\ W$$

$$P_{motor} = \frac{P_{total}}{\eta} = \frac{32,017}{0,75} = 42,689\ W$$

A este valor de potencia le hace falta considerar el peso adicional del motor del eje secundario, el cual va a encontrarse colgado de un lado de la estructura de sujeción. Para minimizar este efecto es necesario colocar un contrapeso en el otro extremo de la estructura, de tal manera que el momento en el eje externo sea cero debido a que las cargas adicionales se encuentran a la misma distancia y poseen el mismo peso.

Como medida de protección para el motor debido a estas cargas adicionales se va a considerar un factor de seguridad de 1,5 el cual permite tener la seguridad de que la potencia del motor va a ser suficiente para el movimiento de la estructura de sujeción.

$$P_{motor\ carga} = P_{motor} * F.Seg = 42,689 * 1,5 = 64,034\ W$$

La potencia del motor requerido es de aproximadamente 65W, lo cual supera el valor máximo de los motores de plumas empleados para el eje interno, por lo que se debe emplear un motor más fuerte. El siguiente motor comercialmente es un motor de 1/8 de HP, pero que contenga una caja reductora de tipo tornillo sinfin-corona. Sin embargo este tipo de motor, no se consigue fácilmente, ya que la velocidad de trabajo de éste, resulta ser una velocidad baja para la mayoría de aplicaciones, por lo que solo se encuentra comercialmente motores de las siguientes características:

Tabla 8. Características del motor eje primario.

Características	
Potencia	1/8 HP
Voltaje Alimentación	12 Vdc
Velocidad	90 RPMs
Tipo de Reductor	Engranés Rectos

Este motor resulta conveniente en términos de potencia y torque, sin embargo tiene problemas con la velocidad y el tipo de reducción, ya que no asegura el mantener la posición una vez se ha des energizado. Por estos motivos se va a realizar una caja reductora adicional de tipo tornillo sinfín-corona.

3.3.5. Diseño caja reductora

El primer elemento a considerar en la caja reductora es el material del que va a estar hecho, dado que los ejes se encuentran hechos de acero AISI1018, se puede mantener este mismo material como base y verificar su resistencia.

Después se establece la reducción necesaria la cual se calcula como

$$i = \frac{RPMs\ entrada}{RPMs\ salida} \quad (3.22)$$

Se conocen los datos tanto de la entrada que es la velocidad nominal del motor, como la de salida que es la velocidad que se está buscando.

$$i = \frac{RPMs\ entrada}{RPMs\ salida} = \frac{90}{6,25} = 14,4$$

Esta relación debe ser un número entero, por lo que la se va a aproximar al entero más cercano es decir 14 veces.

La característica que determina que un sinfín corona sea auto bloqueante viene dada por la reversibilidad estática. Se dice que un reductor tiene una baja reversibilidad cuando para girarlo desde el eje lento es necesario aplicar un par muy alto o grandes cargas vibratorias. Este grado de reversibilidad es función del ángulo de la hélice principalmente, pero también se ve afectado por la velocidad del reductor, el rendimiento estático y dinámico y la lubricación. Considerando principalmente el ángulo de la hélice se tienen las siguientes características:

Tabla 9. Tabla de Irreversibilidad en función del ángulo de hélice.

	Irreversibilidad	
	dinámica	estática
$\beta > 20^\circ$	Reversibilidad total	
$10^\circ < \beta < 20^\circ$	Alta reversibilidad dinámica	Reversibilidad casi total - Retorno rápido
$8^\circ < \beta < 10^\circ$	Alta reversibilidad dinámica Baja irreversibilidad	Retorno rápido
$5^\circ < \beta < 8^\circ$	Baja reversibilidad dinámica, pero fácilmente reversible en caso de vibraciones	Buena reversibilidad y bajo autobloqueo
$3^\circ < \beta < 5^\circ$	Baja reversibilidad dinámica y buena irreversibilidad	Muy baja reversibilidad y buena irreversibilidad
$1^\circ < \beta < 3^\circ$	Irreversibilidad total	

Con esto se conoce que el ángulo máximo en la hélice es de: 5°. Este ángulo de hélice se relaciona con las demás características mediante la fórmula:

$$\tan \alpha = \frac{L}{\pi * dw} \quad (3. 23)$$

En donde, α es el ángulo de hélice, dw es el diámetro de paso del tornillo sinfín y L es el avance. El avance viene determinado por:

$$L = P_x * N_W \quad (3. 24)$$

Donde L es el avance, P_x es el paso axial, y N_w es el número de entradas del tornillo. El paso axial del tornillo es igual al paso circular transversal de la corona, debido a que el ángulo entre los ejes mide 90°. El paso circular de un engrane se calcula en función del módulo de la fresa con la que es fabricado cumpliendo la fórmula:

$$P_c = \pi * M \quad (3. 25)$$

Se va a trabajar con una fresa de módulo 2 con lo que se tiene

$$P_x = P_c = \pi * M = 2 * 3,1416 = 6,283 \text{ mm}$$

Si se establece un diámetro base para el tornillo sin fin de 45mm se tiene entonces que el ángulo es:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{L}{\pi * dw} \right) \quad (3. 26)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{L}{\pi * dw} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{P_x * N_W}{\pi * dw} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{6,283 * 1}{\pi * 45} \right) = 2,545^\circ$$

Dicho ángulo está en el intervalo correcto, sin embargo presenta un problema en la fabricación del engrane ya que el tamaño de este sería:

$$d_G = N_G * M = 14 * 2 = 28 \text{ mm}$$

El cual es un tamaño pequeño para una corona, que debe transmitir potencia. Para solucionar esto se puede tanto cambiar el módulo de la fresa, o cambiar el número de dientes.

Se optó por aumentar el número de dientes, ya que para mantener la relación de transmisión de $i=14$, se debe aumentar el número de entradas del sinfín. Esto ayuda a conseguir el efecto auto bloqueante del tornillo sinfín, ya que aumenta el área de contacto de los dientes en los cuales se va a sostener la carga. Con estos nuevos datos se realiza el cálculo del ángulo:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{P_x * N_W}{\pi * d_W} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{6,283 * 2}{\pi * 23} \right) = 5,071^\circ$$

El cual es un valor de ángulo que si bien esta en el límite superior, cumple la condición requerida.

Tabla 10. Resumen Características.

Módulo	m	2
Número de entrada	Nw	2
Número de dientes	Ng	28
Relación de Trasmisión	i	14
Diámetro Primitivo Sinfín	dw	23
Diámetro Primitivo Corona	dg	56
Paso axial y circular	Px	6,28
Distancia entre Centros	C	39,5

Una vez que se ha determinado las características que debe tener la caja reductora del motor principal, se puede emplear estas mismas ecuaciones para comprobar que el moto reductor del eje secundario, cumpla con las características necesarias para garantizar el efecto auto bloqueante. Las características del moto reductor del eje secundario son:

Tabla 11. Características Motoreductor.

Módulo	m	1,5
Número de entrada	Nw	1
Número de dientes	Ng	30
Relación de Trasmisión	i	30
Diámetro Primitivo Sinfín	dw	10
Diámetro Primitivo Corona	dg	45
Paso axial y circular	Px	4,7123
Distancia entre Centros	C	27,5

Con estos datos medidos en el moto reductor se va a calcular el ángulo, teniendo que:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{P_x * N_w}{\pi * d_w} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{4,7123 * 1}{\pi * 10} \right) = 8,5265^\circ$$

El cual es un valor de ángulo que está muy elevado para garantizar el efecto de auto bloqueo en el eje secundario. Por tal motivo se va también a realizar una pequeña caja reductora adicional para el motor secundario.

Para esta caja el factor de diseño más importante a considerar es el peso, debido a que debe ser lo más liviana posible, ya que se va a encontrar colgando junto con el moto reductor. Para garantizar esto se pueden emplear materiales más livianos como lo es el aluminio, sin embargo existe la dificultad de que este material va a estar en contacto directo con la carga,

por lo que no es recomendable emplear materiales de menores propiedades físicas. Por ese motivo se va a emplear el mismo material de la caja reductora del eje principal, es decir AISI1018. La otra alternativa radica en que la caja reductora se diseñe lo más pequeña posible, para así reducir su peso al máximo.

Esto se consigue empleando un módulo pequeño, ya que la mayoría de dimensiones se van a ver afectadas por este. Por eso se escoge módulo de 1, que si bien existen módulos más pequeños, estos no son comerciales y no se los trabaja comúnmente en el país.

El mínimo número de dientes para el engrane de un sistema sin fin corona, es de 30 dientes ya que si se emplea un número menor no se produce el deslizamiento por fricción debido a que los dientes sufren interferencia unos con otros. Con estos requerimientos se puede resumir las características en la siguiente tabla:

Tabla 12. Características Caja Reductora Eje Secundario

Módulo	m	1
Número de entrada	Nw	1
Número de dientes	Ng	30
Relación de Trasmisión	i	30
Diámetro Primitivo Sinfín	dw	10
Diámetro Primitivo Corona	dg	30
Paso axial y circular	Px	3,14
Distancia - Centros	C	20

Con estos datos de la nueva caja reductora se va a calcular el ángulo, teniendo que:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{P_x * N_w}{\pi * d_w} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{3,14 * 1}{\pi * 10} \right) = 5,071^\circ$$

El cual es el mismo valor de ángulo que la caja de reducción, del eje principal por lo cual es aceptable.

3.4. ESTRUCTURA DE SOPORTE DEL CONCENTRADOR

El concentrador y su estructura de sujeción deben estar a una altura que sea por lo menos superior al foco del concentrador, el foco calculado está a una distancia aproximada de 4m, pero esta es la distancia calculada, la real podría variar dependiendo de varios factores, debido a lo cual utilizando una estructura de apoyo provisional y desde una cierta altura se calculó el foco. Con el cálculo real se tiene que el foco está a 315 cm del concentrador. Es decir la estructura de soporte deberá tener un mínimo de 315 cm de altura.

3.4.1. Estructura previa

La estructura que sujetaba anteriormente al concentrador, se componía de una parte que funcionaba como gradas y como columna de fijación y un anillo sobre el cual se colocaba el concentrador como se muestra en la figura 56 mostrada a continuación.



Fig. 56. Estructura anterior

La estructura permite subir por los escalones y por medio de un sistema de manivela (ver figura 57) que permite la rotación del soporte



Fig. 57. Volante de giro

Al ser un soporte de un solo lado es decir una columna que presenta carga en voladizo, el peso del concentrador tiende a pandear hacia adelante a la columna principal formada por los tres tubos debido al peso y para lo cual se había utilizado un cabo amarrado a la parte superior de la estructura que evite este movimiento ver figura 59.



Fig. 58. Cabo de ayuda para soportar el peso

3.4.2. Geometría de la estructura

Basados en la forma preliminar que se encontró se decidió cambiar la forma de la estructura, la estructura no permitía una movilidad correcta en el momento de subir a realizar los cambios, además la columna de soporte sufría de gran esfuerzo debido a la carga en voladizo que le generaba un torque bastante alto. En valores se observa que el concentrador lleno tendría un peso de 50.41 Kg aproximadamente 50Kg es decir que se tendría un momento en ese punto igual a:

$$M = 50Kg * 9.8m/s^2 * 0.6m$$

$$M = 294 Nm$$

La inercia se calculó por medio un software debido a la forma difícil del concentrador y permitir un cálculo más acertado.

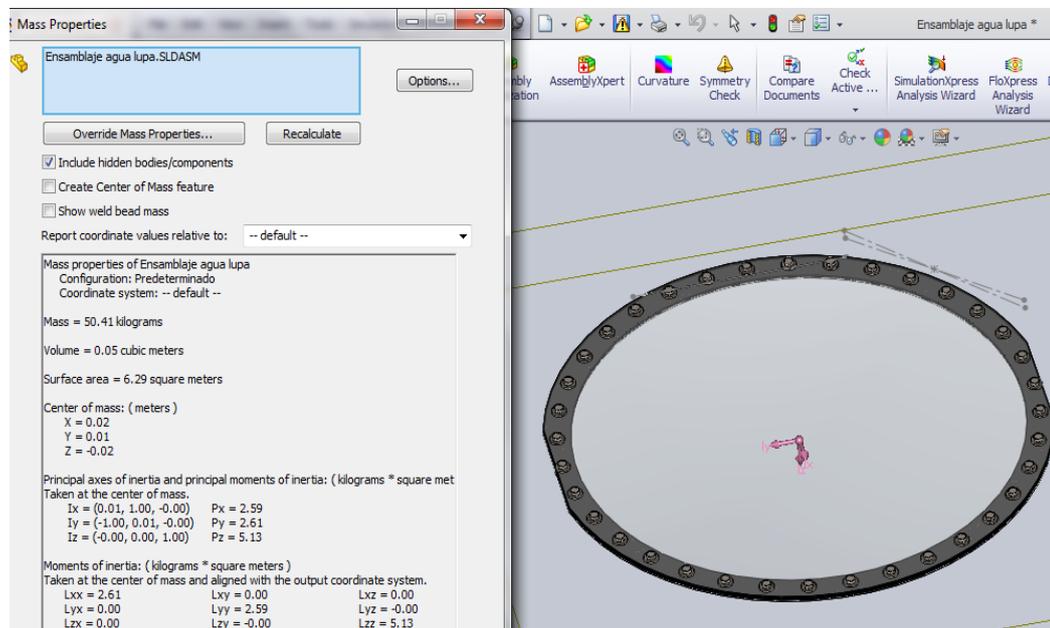


Fig. 59. Inercia del concentrador por Software CAD, CAE comercial

La inercia alrededor del eje z es de 5.13 kg m^2 . Con este dato se calcula la deflexión máxima para el material de soporte que es un acero AISI 1020 con un $E = 200 \times 10^9 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$

Con estos datos se encuentra que la deflexión máxima y , para una viga en voladizo es:

$$y = \frac{w * l^4}{8 * E * I}$$

Dónde:

w Es la carga uniforme del concentrador; l es la longitud del concentrador; E modulo de Young del acero y I es la inercia del concentrador.

$$y = \frac{50\text{Kg} * (1.2\text{m})^4}{8 * 200 * \frac{10^9\text{N}}{\text{m}^2} * 5.13\text{kgm}^2}$$

$$y = 4.8733 * 10^{-12}\text{m}$$

El diseño propuesto para el movimiento en los dos ejes debido a la forma de la estructura de sujeción se deben utilizar dos columnas debido que existen dos chumaceras que necesitan estar fijadas para que puedan soportar el peso de la estructura y que esta estructura además permita que el foco sea lo visible. Por este motivo se propone una estructura con dos columnas que sujeten al concentrador y una estructura adicional que sea móvil para las gradas, de tal manera que no sea una molestia en el momento de realizar las pruebas.

Estas columnas sobre las cuales reposara el concentrador se ven en la figura 60.



Fig. 60. Soportes verticales del concentrador

El material utilizado es acero AISI 1020 con propiedades especificadas anteriormente ver figura 44, el peso que soportaran las columnas está calculado en 79.6Kg aproximadamente 80Kg que se distribuirán entre las columnas para lo cual se realizó un estudio de su comportamiento frente a estos esfuerzos.

3.4.3. Simulación CAD

Para tener una fiabilidad más alta de los cálculos se realizara una simulación cad de los elementos que van a estar sometidos a los esfuerzos, en este caso las columnas que sostendrán al concentrador para lo cual se ha tomado en cuenta el peso del concentrador y el material de fabricación de las columnas. El factor de viento será tomado en cuenta de acuerdo al factor de seguridad del cálculo que se obtenga de la carga principal y de su influencia en el diseño.

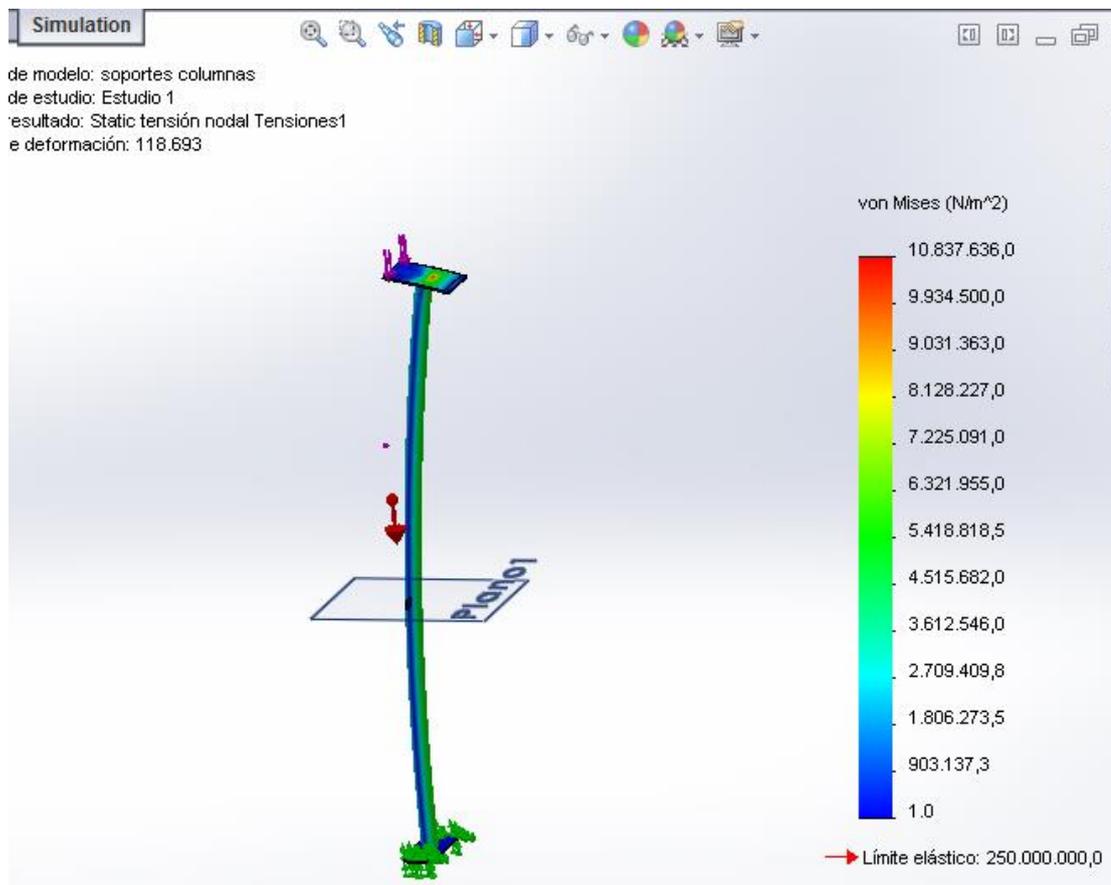


Fig. 61. Simulación CAD de soporte a esfuerzos en SW

En los resultados se obtiene que el esfuerzo máximo en las placas que se usan como soporte para las chumaceras es 10 MPa y el esfuerzo de los tubos es de 7MPa. El punto más crítico se encuentra en la parte superior de la columna en la cual se aplicó el esfuerzo y es de 10.2 MPa y el límite elástico es de 250 MPa.

Teniendo un factor de seguridad de:

$$F. s. = \frac{250}{10.2}$$

$$F. s. = 24.5$$

La deformación máxima permisible en cada columna se muestra en la figura 62.



Fig. 62. Deformacion de los soportes

Con los datos del factor e seguridad y de la deformación que se obtiene, los parantes están sobredimensionados lo que permite tener una seguridad de que la influencia del viento en el concentrador no generara mayor problema.

3.4.4. Diseño Final

Como se puede observar el desplazamiento máximo calculado por el software es de 3 mm en el momento más crítico, valor que permite una confiabilidad alta del soporte. A pesar de que las columnas permiten y soportan el peso del concentrador, se debe tener en cuenta la estabilidad que, por la forma de los parantes no es la más estable por lo que se le añadirá dos soportes a 45° cada uno en cada una de las columnas y permitiendo la estabilidad del mismo, como se muestra en la figura 63.



Fig. 63. Estructura de soporte final

Finalmente se a la estructura se añade gradas que permiten la instalación, mantenimiento y de más soportes que necesite el concentrador.

Las escaleras se modificaron para que permitan un fácil ascenso y además que sean móviles, para una mejor explicación ver figura 64.



Fig. 64. Modelo de gradas

Finalmente se tiene la estructura unida del concentrador, su soporte y las escaleras que le permitirán su acceso.

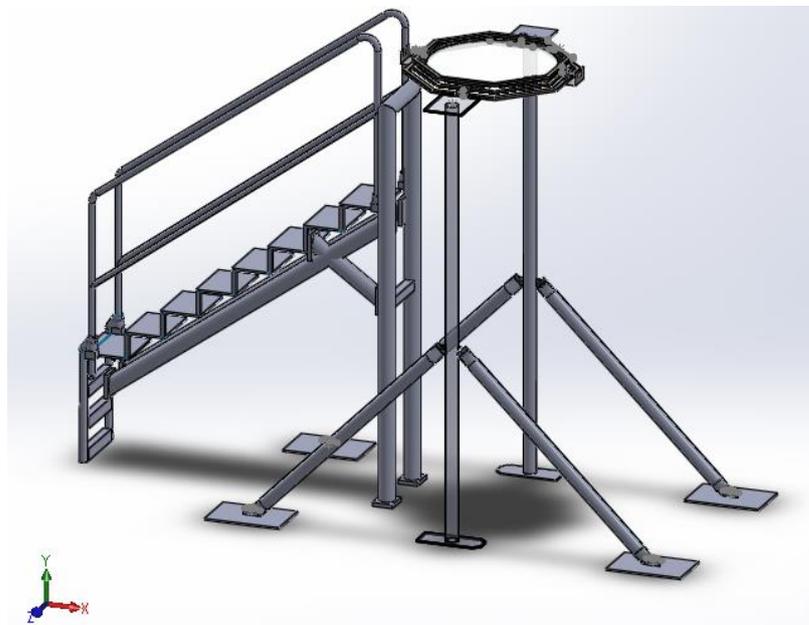


Fig. 65. Modelo final del soporte y las gradas

3.5. ABSORBEDOR

Finalmente la última parte fundamental dentro del sistema del concentrador es el absorbedor o también llamada cámara de reacción, es decir una cámara que permita concentrar la radiación en el punto focal y soportar la temperatura que se generara en dicho punto. Se conoce que esta temperatura alcanza los 400 grados centígrados, es decir que el material debe soportar esta temperatura sin presentar muestras de daño por esfuerzo térmico, el material más común y que es capaz de soportar dichas temperaturas sin presentar problemas es el acero, debido a esto se eligió como material tubos cuadrados y ángulos estructurales de baja aleación utilizados generalmente para la realización de puertas, ventanas, estructuras metálicas, metalmecánica carrocería en general, etc.

ÁNGULOS

DIMENSIONES Y ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

Descripción
Perfil angular a 90° de alas iguales, en acero de baja aleación, laminados en caliente.

Usos
En la construcción de estructuras espaciales, celosías, vigas, columnas, arcos, diafragmas, cerchas.
Metal-mecánica: Industria de muebles, carrocerías para vehículos, puertas, ventanas.
Elementos ornamentales, verjas y cerramientos. Herramientas manuales.
Refuerzo para anclaje de maquinaria.

Normas Técnicas
NTE INEN 2215 (Ecuatoriana)
Perfiles de acero laminados en caliente.

NTE INEN 2224
Perfiles angulares estructurales de acero laminados al caliente.



DIMENSIÓN		MASA NOMINAL		TOLERANCIAS	
mm	kg/m	kg/10m	Ala mm	Espesor mm	
20 x 3	0,871	5,226	± 1	± 0,50	
25 x 3	1,07	6,42			
25 x 4	1,444	8,664			
25 x 6	2,072	12,432			
30 x 3	1,342	8,052			
30 x 4	1,758	10,548			
30 x 6	2,543	15,258			
40 x 3	1,613	10,878			
40 x 4	2,386	14,316			
40 x 6	3,465	20,910			
50 x 3	2,284	13,704			
50 x 4	3,014	18,084			
50 x 6	4,427	26,562			

Tolerancia de longitud: ± 50 mm

PROPIEDADES MECÁNICAS	F45 (mm)	S45	S45 (S45)
Límite de fluencia mínimo	24	235	385
Resistencia a la tracción mínima	34	340	500
Resistencia a la tracción máxima	46	470	540
ALARGAMIENTO (%) MÍNIMO CON PROBETA LANCEOLADA ± 20%			18

Perfiles

Fig. 66 Catálogo Ángulos ADELCA

En la figura 66 se observa parte del catálogo de ADELCA, en el cual muestra ciertas características de sus materiales estructurales, en este caso el ángulo estructural.

El absorbedor debe tener ciertas características como son:

- Se debe poder variar la altura de la cámara
- Se debe variar la posición de giro debido a que el foco no está siempre en el mismo lugar y varía de acuerdo a la hora del día
- No soporta cargas dentro de ella ni fuerzas exteriores más que la del viento, y es lo suficientemente rígido y pesado para que no le afecte el mismo.

De estas características se basa el modelo que a continuación se presenta en la figura 67.



Fig. 67 Esquema Absorvedor

El modelo tiene un soporte fijo de 2 patas, y una unión entre ángulos que permite una abertura de 1.5cm, para que por medio un perno de ½ pulgada y arandelas se pueda sujetar el absorbedor y se pueda regular la posición tanto de rotación como de altura.

En el centro del absorbedor se encuentra un agujero en el cual esta una termocupla, que permite realizar la medición de la temperatura y en la parte inferior, una caja que permite mantener aislado el circuito de acondicionamiento necesario para su funcionamiento. Este circuito no puede estar ubicado más allá de lo que permitan los cables de la termocupla, debido a que el valor medido se ve gravemente afectado por cualquier material que no sea el de las aleaciones cromel y alumel, razón por la cual no se pueden realizar extensiones de cable.

CAPÍTULO 4

DISEÑO ELÉCTRICO - ELECTRÓNICO

4.1. CONTROL DE MOTORES

Para un control adecuado de los motores se requiere que un microprocesador sea capaz de decidir sobre en qué momento debe entrar a funcionar cada motor, con qué sentido de giro, así como también sobre la velocidad a la que estos van a funcionar y ser capaz de invertir el giro para corregir la posición con la mayor precisión posible. El circuito necesario para poder actuar sobre estas condiciones, va a depender en gran parte del tipo de motor que se emplee, ya que existen diferentes circuitos electrónicos que actúan sobre estas condiciones. Para motores de corriente continua, el sentido de giro viene determinado por la polaridad con que se energiza y su velocidad se controla cambiando el voltaje de alimentación o la corriente que circula. Para motores de corriente alterna en cambio, el sentido de giro viene determinado por el sentido del flujo magnético en su interior y su velocidad se controla cortando la onda de voltaje o cambiando la frecuencia de trabajo.

En motores AC el sentido del flujo magnético viene dado por el sentido de circulación de la corriente, ya que se genera un campo magnético a su alrededor con una dirección perpendicular, de acuerdo a la regla de la mano derecha, así al intercambiar la conexión Fase-Neutro en los bornes de alimentación, la dirección se desfasa 180° , y por tanto cambia el sentido de

giro del motor. Esto se puede lograr empleando relés ya que tienen un conector común en donde se conectan los terminales del motor, mientras que en los terminales Normalmente Abierto y Normalmente Cerrado, se conectan Fase y Neutro en un terminal y Neutro y Fase al otro terminal, de tal forma que un borne esté conectado a Fase y el otro a neutro. Cuando se energiza el relé, el borne conectado a Fase se cambia con Neutro y viceversa para el otro borne. De esta forma se cambia el sentido de circulación de corriente y el sentido de giro del motor.

Para el control de la velocidad la primera alternativa es emplear TRIACs, los cuales son semiconductores que permiten el paso de corriente de diferentes polaridades después de un pulso de disparo, requieren DIACs, para su funcionamiento adecuado. En la figura 68 se observa el circuito electrónico, y la señal que se produce mediante el uso de estos elementos. Este pulso de disparo, requiere una calibración adecuada ya que se produce a una frecuencia de 60Hz, es decir cada 16,67ms, para lo que necesita un circuito detector de cruce por cero, y la velocidad depende del control en el tiempo del pulso de disparo.

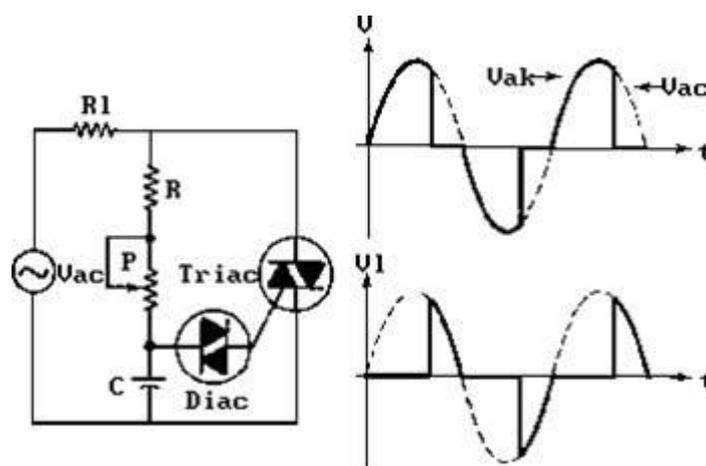


Fig. 68 Circuito de Disparo de un TRIAC.

Otra alternativa es cambiar la frecuencia de alimentación, ya que esta determina la velocidad de giro junto con el número de polos del motor. Para

esto se necesitan emplear circuitos inversores los cuales se controlan mediante un elemento de control.

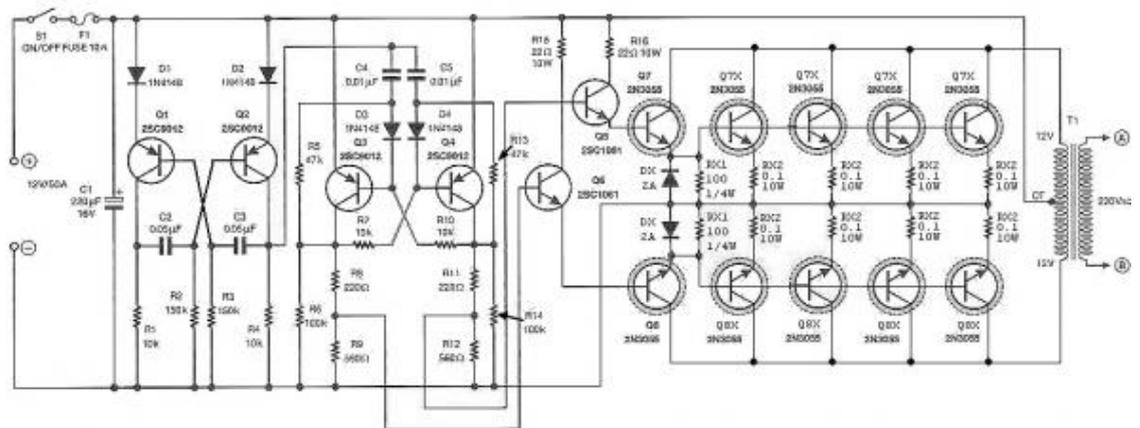


Fig. 69 Circuito Inversor de Voltaje

En la figura 69. se observa un ejemplo de circuito inversor, el cual resulta complejo de fabricar, por la gran cantidad de componentes que requiere. La solución es entonces comprar un Variador de frecuencia, el cual es una máquina que tiene dentro este circuito inversor, y adicionalmente una interfaz para su control. Estos aparatos existen comercialmente en una amplia de gama de especificaciones, pero tienen un costo elevado por las prestaciones que presentan.

En motores DC, la polaridad del motor determina el sentido de circulación de corriente en el motor y como esta se produce en un solo sentido, se puede cambiar el sentido de giro cambiando la polaridad en sus bornes. Esto se realiza de la misma forma que en motores AC con el empleo de relés conectado los puntos comunes a los bornes del motor, o a su vez mediante un circuito llamado puente H.

El puente H es un circuito electrónico que permite a un motor DC girar en ambos sentidos. Como se observa en la figura 70, este circuito consta de 4 transistores de potencia, los cuales funcionan en pares diagonales. Este

circuito tiene ventajas sobre el empleo de relés debido a que los relés funcionan mediante un electroimán que mueve un contacto, el cual se va desgastando a lo largo del tiempo. Este contacto es el que conecta el punto común con el borne normalmente cerrado, o con el normalmente abierto, por lo que requiere de un tiempo en el cual el contacto se desplaza de un borne al otro. Esto limita la velocidad de conmutación del relé, al mínimo tiempo que necesita el contacto para llegar a una posición distinta. Mientras que el puente H, con transistores no tiene elementos internos en movimiento que se desgasten, ni tampoco limitación mecánica en su velocidad de conmutación, sino que esta depende de las condiciones electrónicas especificadas por el fabricante.

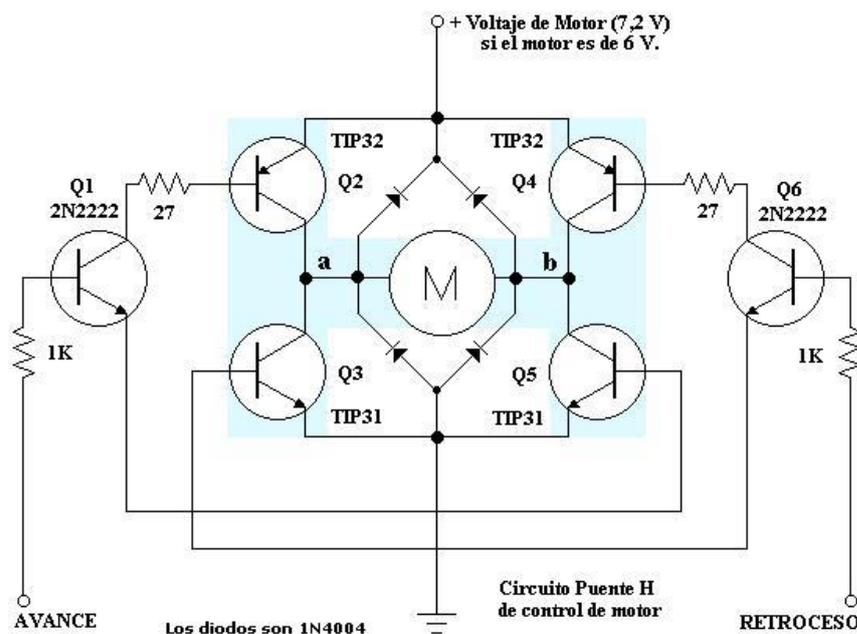


Fig. 70 Circuito Puente H de control de motor

Para el control de la velocidad la primera alternativa es cambiar el voltaje efectivo que llega al motor. Esto se puede realizar enviando trenes de pulsos de voltaje a una determinada frecuencia, con un tiempo en alto y tiempo en bajo determinados. A esta técnica de control se la conoce como PWM por sus siglas en inglés, "*Pulse Width Modulation*", que significan control del

ancho de pulso. El PWM cambia el voltaje efectivo de alimentación al cambiar el tiempo en alto y en bajo del tren de pulsos.

Otra alternativa es cambiando la corriente que circula por el motor, añadiendo elementos como resistencias las cuales varían dicho valor. El inconveniente de esta alternativa radica en cambiar la resistencia de un elemento conectado, ya que se requiere de un dispositivo adicional que realice dichos cambios en la resistencia.

Finalmente en el circuito de puente H, se puede aplicar PWM, aplicándolo en las entradas de señal de avance y retroceso directamente. Por estas razones es que la mejor opción radica en utilizar un motor DC, el cual va a ser controlado por PWM aplicado directamente al puente h.

4.1.1. Puente H

Un puente H es un arreglo de transistores, en forma de puente, en el cual deben existir dos tipos de transistores: El primero es un transistor tipo PNP, y el otro debe ser un tipo NPN, para lograr su adecuado funcionamiento, ya que en ambos el emisor debe estar conectado directamente a tensión y tierra respectivamente. El funcionamiento del puente H consiste de la siguiente forma: Cuando no existe señal de avance, ni de retroceso en los transistores Q1 y Q6, no existe paso de voltaje desde la alimentación del motor. Cuando se envía la señal de adelante a Q1, este transistor entra en estado de saturación y permite el paso de voltaje hacia Q2 y Q5. Una vez estos reciben una señal de voltaje entran también en estado de saturación permitiendo que el transistor Q2 conecte el "nodo a" con voltaje de alimentación mientras que el transistor Q5 conecta el "nodo b" directo a tierra. De esta forma se genera un sentido de circulación de corriente desde el nodo a hacia b, lo que produce un sentido de giro.

Cuando se envía la señal de retroceso a Q6, este transistor entra en estado de saturación y permite el paso de voltaje hacia Q3 y Q4. Una vez estos reciben una señal de voltaje entran también en estado de saturación permitiendo que el transistor Q4 conecte el "nodo b" con voltaje de alimentación mientras que el transistor Q3 conecta el "nodo a" directo a tierra. De esta forma se genera un sentido de circulación de corriente desde el nodo b hacia a, lo que produce un sentido de giro contrario al sentido anterior.

4.1.2. Diseño del Puente H

La principal condición de diseño para un puente H, es la corriente que debe circular a través de él. Para conocer este dato se puede partir de la potencia del motor y su voltaje de alimentación los cuales se relacionan con la corriente mediante la fórmula:

$$P = V * I \quad (3. 27)$$

$$I_e = \frac{P}{V} = \frac{93,25 \text{ W}}{12 \text{ V}} = 7,77 \text{ A}$$

$$I_i = \frac{P}{V} = \frac{40 \text{ W}}{12 \text{ V}} = 3,33 \text{ A}$$

Con esto se encuentra que la máxima corriente que va a circular en el puente es de aproximadamente 8 Amperios. Este valor de corriente no se encuentra en transistores TIP de encapsulado TO-22C, que se utilizan comúnmente en circuitos, sino en transistores tipo Darlington, los cuales son mucho mayores en tamaño y costo.

Dadas estas condiciones resulta mejor emplear MOSFET los cuales son un tipo de transistor utilizado para amplificar o conmutar señales electrónicas. Su nombre significa **Transistor de efecto de campo metal-óxido-semiconductor** (en inglés *Metal-oxide-semiconductor Field-effect transistor*), y su principal diferencia con un transistor común, es que el corte y saturación del mismo no se produce por corriente, si no debido a una tensión en la alimentación.

Los Mosfets tienen un tamaño muy inferior al transistor bipolar, por lo que pequeños elementos en un encapsulado TO-22C, pueden soportar grandes corrientes en su interior. Al igual que con los transistores, para el diseño adecuado del puente H mediante transistores MOSFET, es necesario emplear 2 tipos diferentes. El tipo N, que resulta equivalente a un transistor NPN debido a que el emisor se conecta a tierra, y el tipo P, que resulta equivalente a un transistor PNP ya que se conecta a la alimentación. Cabe aclarar que los nombres de los terminales cambian en la tecnología MOSFET. Los equivalentes son: Base - Gate, Emisor - Source, Colector - Drain, siendo los nombres en inglés los utilizados para los terminales Mosfet.

Para el transistor Mosfet tipo N, se va a emplear el IRFZ44, el cual es el modelo más comercial en el Ecuador. Sus características se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 13. Características Transistor Mosfet IRFZ44.

Código	Canal	Corriente	Tensión	Potencia	Resistencia	Encapsulado
		Id (A)	Vds (V)	Pd (W)	Rds (Ohms)	
IRFZ44N	N	49	55	94	0,018	TO-220

Para el transistor Mosfet tipo P, se debe emplear un transistor de similares o mejores características que el que se escogió en canal N. El

transistor escogido es el IRF9540N, el cual posee las siguientes características:

Tabla 14. Características Transistor Mosfet IRF9540N.

Código	Canal	Corriente	Tensión	Potencia	Resistencia	Encapsulado
		Id (A)	Vds (V)	Pd (W)	Rds (Ohms)	
IRF9540N	P	23	100	140	0,117	TO-220

Si bien la corriente del transistor mosfet IRF9540 es menor que la del IRFZ44, se observa que tanto el voltaje que soporta como la potencia que disipa son mayores en este, por lo que se puede utilizar tranquilamente como equivalente de canal P.

El circuito queda finalmente como se observa en la figura 71.

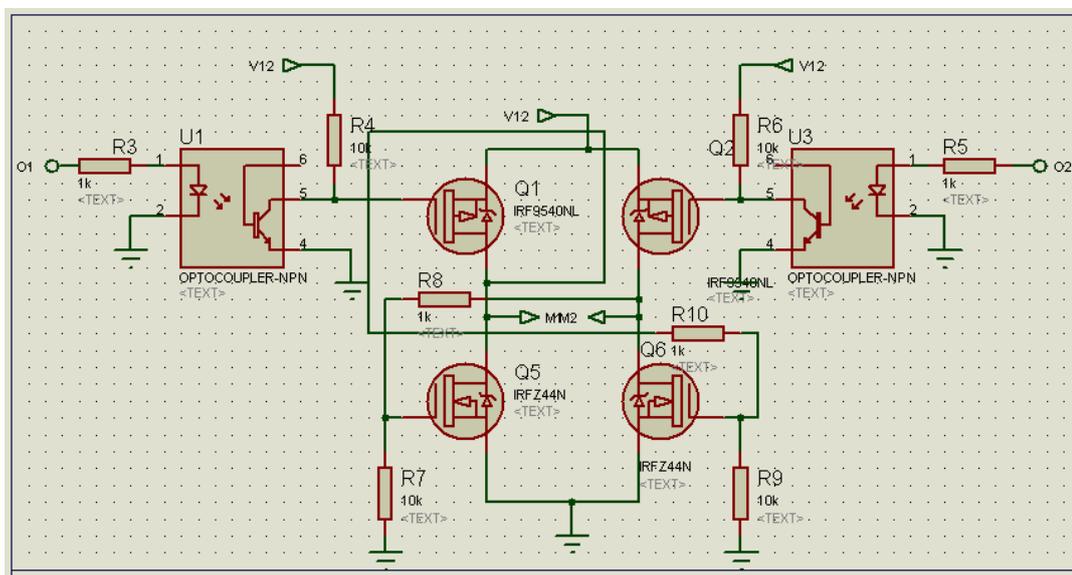


Fig. 71 Circuito Puente H mediante Transistores MOSFET

Como se observa en la figura 71, los mosfet tipo P, es decir IRF9540, en su terminal de Source se conecta directamente el voltaje de alimentación de los motores, mientras que para los mosfet tipo N, IRFZ44, su terminal de

Source, se conecta directamente a tierra. El control de los mismos viene de una señal externa que va al microprocesador, pero que se va a proteger eléctricamente mediante el uso de opto acopladores.

Estos opto acopladores se utilizan para separar el circuito de control del circuito de potencia y así prevenir daños por sobre corrientes en el elemento de control. Finalmente el puente se completa con 2 resistencias de 1 K y 10 K Ohmios respectivamente. Estas resistencias tienen la función de generar un divisor de voltaje que sirve de señal de control para el mosfet tipo N, ya que cuando el mosfet P, no está en saturación, no existe voltaje en el divisor y por tanto la señal en el mosfet N es de corte. Pero una vez que existe la señal en un mosfet P, este permite el paso de corriente de Source a Drain, con lo que el divisor se energiza también. Este voltaje se distribuye en un 10% en la resistencia de 1K Ohmio y 90% en la resistencia de 10K Ohmios, debido a su relación entre resistencia. La tensión mínima para cambiar de Corte a Saturación en transistores mosfet es de 7 Voltios aproximadamente, por lo que el 90% de 12Volts, es decir 10,9 Volts es suficiente para conmutar el mosfet N a estado de saturación. La pérdida de potencia por estas resistencias es de:

$$P = V * I = V^2/R \quad (3. 28)$$

$$Pd = \frac{12^2}{11 * 10^3} = 13,09 \text{ mW}$$

El cual es un valor muy bajo de disipación y es la razón por la que se escogieron estas resistencias.

Finalmente es necesario para el funcionamiento adecuado de los motores el emplear un esquema de diodos en antiparalelo, de tal forma que la corriente almacenadas en la inductancia del motor, se liberen de una manera adecuada en el motor, en un solo sentido de circulación, y no circule corriente en sentido inverso.

4.2. SELECCIÓN DE SENSORES

Para el monitoreo de variables de proceso y además para determinar el seguimiento solar, se utilizan varios sensores que permitan obtener información sobre estas variables. A continuación se detallan los sensores utilizados en el equipo.

4.2.1. Sensores de Luz

Entre los sensores que se utilizaran para el equipo, se encuentran los sensores de luz. Los sensores fotoeléctricos o fotocélulas son dispositivos electrónicos que varían su estado o señal de acuerdo a la intensidad de la luz. El principio de funcionamiento de estos sensores se basa en una señal emitida de luz que es el emisor y un receptor de la misma señal. Estos dispositivos son utilizados normalmente en detección, clasificación y posicionado de objetos; la detección de formas, colores y diferencias de superficies. Un sensor de luz incluye un transductor fotoeléctrico para convertir la luz a una señal eléctrica y puede incluir electrónica para condicionamiento de la señal.

Hay tres tipos principales de sensores fotoeléctricos como se pueden ver en la figura 72:

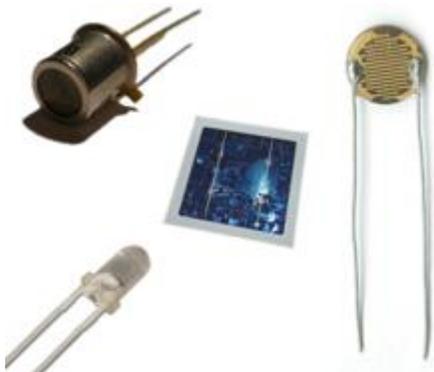


Fig. 72 Sensores Fotoeléctricos

El primero es el fototransistor, el cual es un elemento que cuando la intensidad de luz alcanza cierto valor de umbral, este conmuta su estado de corte a saturación. No se utiliza normalmente como transistor debido a que su zona de amplificación no varía linealmente con la intensidad de luz que recibe, y se utiliza más como componente principal de opto acopladores en donde la intensidad de luz viene dada por el uso de leds en su interior.

Otro tipo es el fotodiodo, el cual es un diodo que permite el paso de corriente a través de sí, dependiendo de la intensidad de luz que recibe. Tiene la ventaja de ser el más lineal de todos los sensores fotoeléctricos, pero se utiliza principalmente para sensar luz infrarroja ya que esta produce mayores variaciones en su conducción de corriente.

Finalmente uno de los sensores más utilizados es el LDR (Light Dependant Resistor) un sensor que depende la luz para variar su resistencia eléctrica. El LDR es básicamente un resistor que cambia su valor de resistencia al variar la intensidad de la luz. Este sensor resulta especialmente útil si se lo utiliza en un divisor de voltaje ya que al variar su resistencia permite variar la señal de tensión en el divisor.

De los sensores antes mencionados se observa que el que ofrece mayores posibilidades de control, es el LDR ya que depende directamente de la intensidad de luz que recibe, además que tiene la ventaja de ser muy comercial y a un bajo costo.

4.2.1.1. LDR

El LDR es un foto resistor de alta resistencia que está hecho de sulfuro de cadmio, CdS, este componente le permite que cuando la luz de alta frecuencia incide sobre él, los electrones se exciten y empiecen a tener

conducción de tal manera que el hueco que deja el electrón al saltar produce que disminuya la resistencia, los valores más típicos de variación en los LDR están entre $1M\Omega$, en gran oscuridad y 100Ω cuando hay más luz.

El LDR tiene un tiempo de respuesta lento a la variación de la luz, esta respuesta está en el orden de las décimas de segundo, por lo que para aplicaciones de alta rapidez de cambio en la luz este sensor no es aplicable, pero en casos como detección de día, y noche donde la velocidad no es alta, resulta muy útil. Como el movimiento relativo del sol en el horizonte es muy lento, resulta factible la utilización de este sensor. En la figura 73 se observa la gráfica del foto resistor.



Fig. 73 LDR

Como ya se menciona para poder emplear este sensor de manera correcta se necesita utilizarlo como parte de un divisor de voltaje de tal manera que produzca un cambio de tensión que pueda ser entendido por un microprocesador.

4.2.1.2. Acondicionamiento LDR

La variación de resistencia por sí misma no puede ser medida más que por equipos especializados como ohmetros, por lo que esta variación no se puede utilizar directamente, pero al colocarla en un divisor de tensión se puede medir el cambio de tensión en el mismo el cual es una variable que si se mide directamente.

El microprocesador posee un puerto ADC, es decir un conversor analógico-digital capaz de realizar dicha medición directa del voltaje en el divisor. El esquema de divisor de voltaje es el siguiente: Ver figura 74

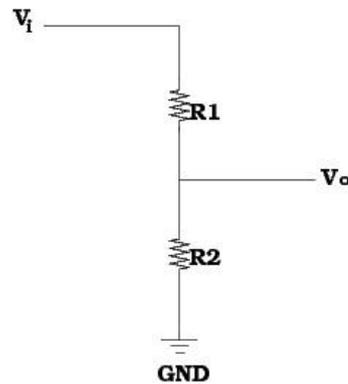


Fig. 74 Esquema Divisor de Voltaje

$$V_1 = V_s * \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \quad (3.14)$$

El voltaje de alimentación V_i es de 5V, R_1 es una resistencia de valor conocido que se mantiene fijo, R_2 es la resistencia variable del LDR, y V_o es el voltaje de salida del divisor de voltaje que se lee en el ADC del microprocesador. El valor del LDR en R_2 varía entre 1K Ω y 100 Ω .

Hay que determinar el valor de R_1 óptimo que permita tener una sensibilidad eléctrica adecuada. Para conocer el valor de resistencia adecuado se va a calcular cómo se comporta un divisor de voltaje al tener una resistencia fija y variar el valor de la otra resistencia.

De esta tabla se puede determinar su comportamiento al graficar el voltaje de salida como se ve en la figura 75.

Tabla 15 Divisor de Voltaje Prueba.

R1	R2	Vo
100	0	1
	20	0,83333333
	40	0,71428571
	60	0,625
	80	0,55555556
	100	0,5
	120	0,45454545
	140	0,41666667
	160	0,38461538
	180	0,35714286
	200	0,33333333
	220	0,3125
	240	0,29411765
	260	0,27777778
	280	0,26315789
	300	0,25
	320	0,23809524
	340	0,22727273
	360	0,2173913
	380	0,20833333
	400	0,2
	420	0,19230769
	440	0,18518519
	460	0,17857143
	480	0,17241379
	500	0,16666667

De la gráfica 75 se puede concluir que el divisor de voltaje tiene un comportamiento más lineal a medida que aumenta su resistencia, más allá del valor de la resistencia fija en donde se alcanza la mitad del voltaje de alimentación.

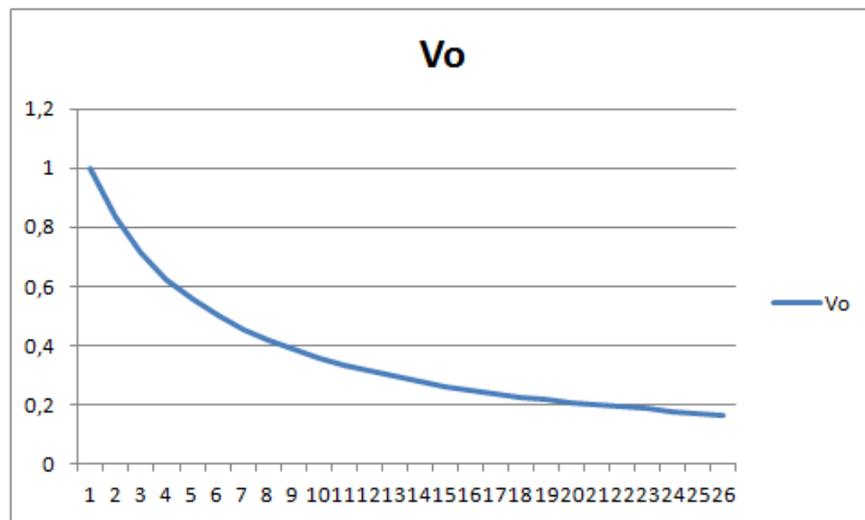


Fig. 75 Voltaje de Salida Prueba Divisor de Voltaje

Como el LDR reduce su resistencia al estar iluminado, se debe garantizar que la parte más iluminada, que está perpendicular al sol, se encuentre aún en la parte lineal del divisor. Por tanto se debe emplear una resistencia fija igual al valor de resistencia de los ldrs a su máxima iluminación.

Experimentalmente se determinó que el valor de resistencia del ldr al estar perpendicular al sol es de aproximadamente 200 Ohms. Por tal motivo se deben emplear resistencias de este valor o mayores. Sin embargo las resistencias comerciales no tienen una precisión que permita garantizar que dos ldrs diferentes, acondicionados en un divisor, marquen un mismo valor de tensión de salida, lo cual como se verá más adelante es un requisito muy importante para el seguimiento solar.

Por tal motivo se utilizan potenciómetros de precisión que permitan establecer un valor preciso de resistencia, y de ser necesario ajustar ese valor para garantizar que la tensión de salida de dos LDRs diferentes, pero que se encuentren perpendiculares al sol, sea la misma.

4.2.2. Sensores de Radiación

Para la medición de la radiación se utiliza un piranómetro o también llamado solarímetro y actinómetro, este instrumento meteorológico que mide la radiación solar de una manera muy precisa. Con este dispositivo se puede medir el flujo de radiación solar en un campo de 180 grados. Generalmente existen tres medidas de radiación que son: semiesférica total, difusa y directa, generalmente utilizan un termopar en el cual incide la radiación a través de dos cúpulas semiesféricas de vidrio y las medidas son proporcionadas en $\frac{Kw}{m^2}$.

Sensor de Radiacion Vantage Pro2™

Este sensor mide la radiación global es decir la radiación directa y difusa ambas componentes de la irradiancia solar. El transductor del sensor que convierte la incidencia de radiación en corriente eléctrica, es un fotodiodo de silicón con una amplia respuesta espectral, la salida del sensor muestra la irradiancia en voltaje, en un periodo de tiempo determinado.



Fig. 76 Piranómetro Vantage Pro 2

La cubierta exterior protege el cuerpo del sensor de la radiación térmica y proporciona una ruta de flujo de aire para el enfriamiento por convección del cuerpo, minimizando el calentamiento del interior del sensor. El espacio entre la carcasa y el cuerpo también proporciona una ruta para el agua de que se puede quedar dentro, reduciendo en gran medida la posibilidad de que se acumule dentro el agua lluvia.

Cosine Response (typical)

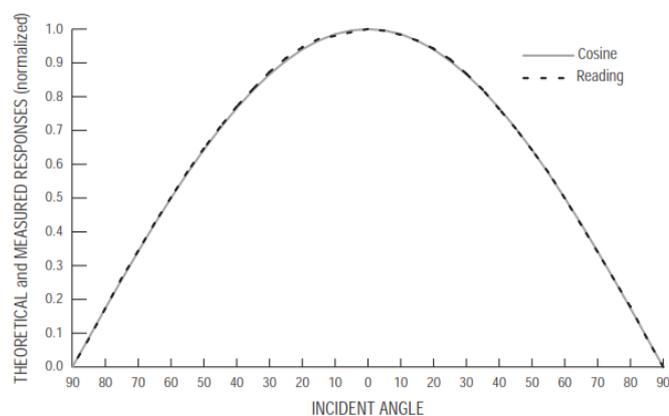


Fig. 77 Ángulo de Incidencia

El difusor está soldado al cuerpo para un sello hermético; que proporciona una excelente respuesta del coseno. Esta respuesta coseno se observa en la figura 77. El transductor un fotodiodo de silicio herméticamente sellado; el amplificador que incluye convierte la corriente del transductor en voltajes de 0 a 2,5 VDC.

4.2.2.1. Acondicionamiento Sensores de Radiación

La salida del sensor es una señal analógica que varía entre 0 y 2.5 v, por esta razón lo único que se debe realizar es la lectura del sensor por un puerto analógico del microprocesador teniendo en cuenta la siguiente conversión.

De la tabla se conoce que la resolución máxima es de 1.38 mv / W/m², teniendo en cuenta eso, se puede realizar la conversión en el microprocesador para la correcta impresión de los datos en la pantalla de visualización.

Piránometro Davis		Lectura del microprocesador	
Voltaje	Irradiancia	Voltaje	bites
voltios(v)	W/m ²	voltios(v)	bytes
0	0	0	0
2,5	1800	2,5	1024

Fig. 78. Conversión de datos y lectura del piránometro

4.2.3. Sensores de Temperatura

Para los sensores de temperatura se determina en qué puntos es necesario conocer la temperatura, ya que aporta información al estudio. Es así que se determina tres lugares de los cuales conocer la temperatura:

- Temperatura en el Foco.
- Temperatura Ambiente.
- Temperatura en el Concentrador.

4.2.3.1. Sensor de Temperatura en el Foco

De ensayos de fotohidroconversión anteriores se conoce que la temperatura que se desea medir en el foco, va a estar alrededor de los 500 grados centígrados por lo que se necesita un sensor capaz de soportar altas temperaturas. El sensor de altas temperaturas más comercial es la termocupla, la cual permite medir temperaturas de hasta 1350 grados centígrados de acuerdo al tipo de la misma. Las termocuplas son ampliamente usadas en la industria por su costo relativamente bajo y su amplia aplicación, aunque no son recomendables cuando se desean

precisiones por debajo de un grado centígrado, ya que empiezan a tener errores. Los termopares o termocuplas están presentes en diferentes tipos y formatos, a continuación se detalla acerca de algunos tipos de termocuplas, de acuerdo al artículo tomado de Wikipedia (Creus, 2014):

- **Tipo K** (cromel/alumel): con una amplia variedad aplicaciones, está disponible a un bajo costo y en una variedad de sondas. El cromel es una aleación de Ni-Cr, y el alumel es una aleación de Ni-Al. Tienen un rango de temperatura de $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+1372\text{ }^{\circ}\text{C}$ y una sensibilidad $41\text{ }\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ aproximadamente. Posee buena resistencia a la oxidación.
- **Tipo E** (cromel/constantán [aleación de Cu-Ni]): no son magnéticos y gracias a su sensibilidad, son ideales para el uso en bajas temperaturas, en el ámbito criogénico. Tienen una sensibilidad de $68\text{ }\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$.
- **Tipo J** (hierro/constantán): su rango de utilización es de $-270/+1200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Debido a sus características se recomienda su uso en atmósferas inertes, reductoras o en vacío, su uso continuado a $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ no presenta problemas, su principal inconveniente es la rápida oxidación que sufre el hierro por encima de $550\text{ }^{\circ}\text{C}$; y por debajo de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ es necesario tomar precauciones a causa de la condensación de vapor de agua sobre el hierro.
- **Tipo T** (cobre/constantán): ideales para mediciones entre -200 y $260\text{ }^{\circ}\text{C}$. Resisten atmósferas húmedas, reductoras y oxidantes y son aplicables en criogenia. El tipo termopar de T tiene una sensibilidad de cerca de $43\text{ }\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$.
- **Tipo N** (nicrosil [Ni-Cr-Si]/nihil [Ni-Si]): es adecuado para mediciones de alta temperatura gracias a su elevada estabilidad y resistencia a la oxidación de altas temperaturas, y no necesita del platino utilizado en los tipos B, R y S, que son más caros.

Por otro lado, los termopares tipo B, R y S son los más estables, pero debido a su baja sensibilidad ($10\text{ }\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ aprox.) generalmente son usados para medir altas temperaturas (superiores a $300\text{ }^{\circ}\text{C}$).

- **Tipo B (Pt-Rh):** son adecuados para la medición de altas temperaturas superiores a 1800 °C. Los tipo B presentan el mismo resultado a 0 °C y 42 °C debido a su curva de temperatura/voltaje, limitando así su uso a temperaturas por encima de 50 °C.
- **Tipo R (Pt-Rh):** adecuados para la medición de temperaturas de hasta 1300 °C. Su baja sensibilidad (10 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$) y su elevado precio quitan su atractivo.

Tipo S (Pt/Rh): ideales para mediciones de altas temperaturas hasta los 1300 °C, pero su baja sensibilidad (10 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$) y su elevado precio lo convierten en un instrumento no adecuado para el uso general. Debido a su elevada estabilidad, el tipo S es utilizado para la calibración universal del punto de fusión del oro (1064,43 °C).

Los termopares con una baja sensibilidad, como en el caso de los tipos B, R y S, tienen además una resolución menor. La selección de termopares es importante para asegurarse que cubren el rango de temperaturas a determinar. La termocupla escogida es una termocupla tipo K, debido a que puede alcanzar valores mayores al esperado en el foco, además que es un sensor muy comercial en el Ecuador. de un costo bajo.

Una vez escogida la termocupla es necesario acondicionar la señal ya que, si bien la salida viene dado en valores de voltaje, estos resultan muy bajos al estar en el orden de los micro voltios, por lo que es necesario un acondicionamiento de dicha señal. Existen chips comerciales que realizan dicho acondicionamiento y envían la señal de dos formas distintas. La primera lo realiza de forma analógica, amplificando directamente la señal de la termocupla, considerando el efecto de la temperatura ambiente. Esta forma tiene el inconveniente de que al amplificar una señal analógica, es muy sensible al ruido eléctrico, por lo cual no es recomendable en aplicaciones en donde el sensor no se encuentre fijo en un lugar.

La segunda forma se realiza digitalizando la señal de la termocupla, y enviando la información leída mediante bus SPI. Al estar digitalizada la información es menos sensible al ruido y por tanto se puede emplear en aplicaciones con un sensor móvil.

El Bus SPI (del inglés Serial Peripheral Interface) es un estándar de comunicaciones, usado principalmente para la transferencia de información entre circuitos integrados en equipos electrónicos. Incluye una línea de reloj, dato entrante, dato saliente y un pin de chip select, que conecta o desconecta la operación del dispositivo con el que uno desea comunicarse. De esta forma, este estándar permite multiplexar las líneas de reloj. El SPI es un protocolo síncrono. (Microchip Company)

Se ha optado por esta opción de acondicionamiento de la termocupla, debido a que no presenta inconvenientes en sensores móviles. El chip que utiliza esta forma es el chip MAX6675.

4.2.3.2. Sensor de Temperatura Ambiente

Para censar la temperatura ambiente se ha utilizado sensores DS18B20 de protocolo One Wire, los cuales son comerciales, y mucho más robustos que otros sensores de bajas temperaturas. Estos sensores permiten medir temperaturas de hasta 125 grados centígrados, con una precisión ajustable y como la temperatura ambiente en Sangolquí no sobrepasa los 35 grados centígrados, estos sensores cumplen el rango de medidas.

DS18B20 Es un termómetro digital que ofrece una resolución de 9 a 12 bits que puede ser configurable. La información se envía desde el DS18B20 a través de una interfaz 1-Wire

Protocolo One Wire

Es un protocolo de comunicación creado por Dallas Semiconductor y está basado en un bus, un maestro y varios esclavos alimentados en una sola línea de datos. En principio los dispositivos de este tipo se alimentan con corrientes parasitas, aunque necesitan referencia a tierra.

Los esclavos se identifican a través de un valor de ID también puede ser conocida como dirección MAC, el cual puede ser seleccionado físicamente, de esta forma es posible la comunicación en un bus. La comunicación puede ser bidireccional pero debido a limitaciones Tumbaco, P; Barrionuevo, C; 2014s del sistema soporta half duplex como máximo.

Definición de los distintos estados

El sistema de comunicación soporta 5 estados por lo general, aunque dependiendo de los dispositivos esto puede variar, aunque todos se especifican siguiendo una misma regla. Estos estados son el START, RESET, DATA0, DATA1, ATTEMP_REQUEST. Los datos se envían o reciben bit por bit siguiendo una regla y el tiempo de espera entre un bit y otro no está limitado, cada dispositivo one wire tiene en su hoja de datos las reglas de envío y recepción y los estados por los cuales debe estar los bits para su funcionamiento.

Para el caso del dallas ds18b20, los microprocesadores ya contienen en su entorno librerías cargadas que permiten de manera rápida leer los datos. Al cargar la librería de dallas y del sensor ds18b20 el programador accede a las funciones ya preestablecidas y necesarias para el funcionamiento que se detallan a continuación.

Tabla 16. DS18B20 AJUSTE DE COMANDOS.

INSTRUCCIONES	DESCRIPCION	PROTOCOLO	1-WIRE BUS DESPUES DE EMITIR	NOTAS
COMANDOS DE CONVERSIÓN DE TEMPERATURA				
Convertir temperatura T	Inicio de la conversión de temperatura.	44h	<temperatura leída en estado ocupado>	1
COMANDOS DE MEMORIA				
Leer Memoria	Lee los bytes desde la memoria y los bytes del CRC.	BEh	<Lee datos de hasta 9 bytes>	
Escribir en la memoria	Escribe bytes en la memoria en las direcciones 2 a 4 (TH y TL configuran los disparadores de	4Eh	<escribir datos en 3 bytes en direcciones de 2 a 4>	3
Copia la memoria	Copia los bytes a la memoria no volátil (únicamente direcciones de 2 a 4).	48h	<estado de leer y copiar>	2
Recuperación E²	Recuerda valores almacenados en la memoria no volátil (temperatura de los disipadores).	B8h	<temperatura>	
Leer la Fuente de Alimentación	Leer la fuente de alimentación del modo de Señales fuente de alimentación de DS18B20	B4h	<estado de leer temperatura>	

4.2.3.3. Sensor de Temperatura en el Concentrador

El concentrador solar va a estar permanentemente recibiendo la radiación proveniente del sol, y debe dejarla pasar a través de sí cambiando únicamente la dirección de los rayos de luz, sin absorberlos, sin embargo se conoce que eso no sucede así, sino que tanto el acrílico como el agua, absorben parte de esa energía proveniente del sol. Esto genera un aumento en su temperatura el cual es un dato que es importante conocer. La energía absorbida por el agua y el acrílico, debe ser pequeña ya que esto indica que el concentrador está funcionando adecuadamente en vez de disipar la energía que recibe del sol. Por este motivo se espera que la temperatura en el concentrador no supere los 45° centígrados. Entonces se pueden emplear también sensores Dallas ds18b20, ya que supera el rango de valores esperados en el concentrador.

La información se envía desde el DS18B20 a través de una interfaz One-Wire, de modo que necesita un solo conductor y una conexión a tierra, es necesario conectarlo a un microprocesador para la lectura del dato. Para poder realizar la lectura y escritura es necesaria la realización de conversiones de temperatura se puede derivar de la propia línea de datos sin necesidad de una fuente de alimentación externa. Un ejemplo se ve en la figura 79.



Fig. 79 Imagen de un sensor One wire Water proof

Debido a que cada DS18B20 contiene un número de serie único de silicio, pueden existir múltiples DS18B20s en el mismo bus One-Wire. Esto permite la colocación de sensores de temperatura en muchos lugares diferentes. Aplicaciones donde esta característica es útil incluyen HVAC controles ambientales, temperaturas de detección dentro de los edificios, equipos o maquinaria, y el seguimiento y control de procesos.

Características

- Requiere un único pin para la comunicación
- No requiere componentes adicionales
- Puede ser alimentado de una sola línea de datos con un rango entre 3.0 v y 5.5v
- No necesita energía de reserva
- Capaz de medir temperaturas entre -55 a 125 grados centígrados.
- Precisión de 0.5 grados centígrados entre -10 a 85 grados centígrados.
- Resolución programable entre 9 a 12 bits.
- Termómetro a prueba de agua
- Aplicaciones en sistemas industriales, sistemas térmicos.

La conexión del sensor one-wire al arduino, se explica mediante un ejemplo a continuación:

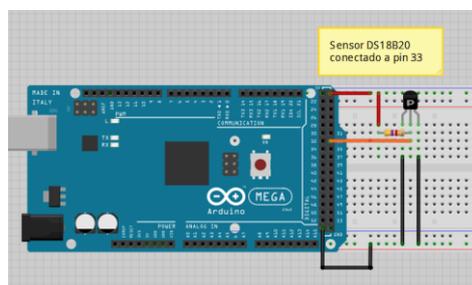


Fig. 80 Ejemplo Conexión Arduino

En la figura 81 se muestra un ejemplo de conexión para un sensor ds18b20, el sensor utilizado no es water proof, pero el principio y conexiones

son las mismas. El sensor únicamente necesita una conexión de una resistencia de 4.7K Ω y su salida al puerto digital del arduino

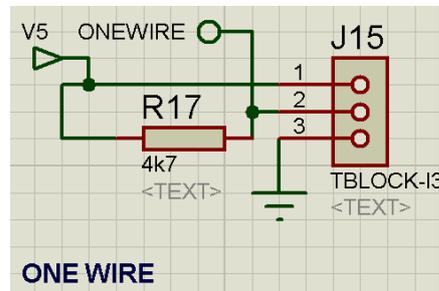


Fig. 81 Conexión de la resistencia para obtener la salida al arduino

4.3. ELEMENTOS DE CONTROL

El sistema posee un sistema de control basado en un microprocesador que en este caso es el arduino, el microprocesador dará las ordenes de acuerdo a la programación de lo que se desea que realicen los motores adicionalmente permite una transmisión y visualización de los datos en las diferentes plataformas que puedan existir. La etapa de control está desarrollada en tres etapas diferenciadas, la de sistema de movimiento de los motores y su control, la visualización de los datos tanto en la pantalla como en la aplicación y el almacenamiento de los datos generados en una plataforma.

Teniendo en cuenta esto se va a diseñar un esquema de control que permita dar consecuencia a lo que se desea realizar. Este esquema se muestra a continuación en la figura 82

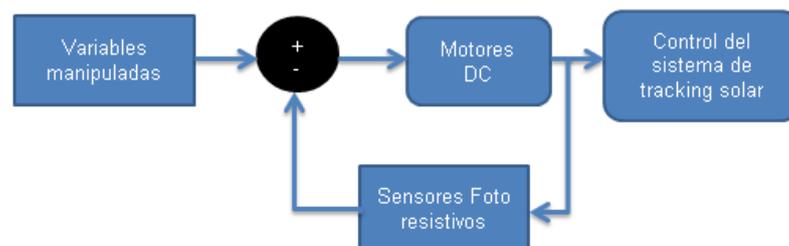


Fig. 82 Diagrama de flujo basico para el control

4.3.1. Arduino

Arduino es una plataforma de hardware libre, que se basa en una placa con un microcontrolador Atmel AVR y su propio entorno de desarrollo, esta placa permite realizar proyectos electrónicos de manera fácil y rápida, de esta manera ha permitido que Arduino no sea usado solo por personas que tengan grandes conocimientos en la programación sino que su fácil ambiente de trabajo ha permitido la inclusión a personas que no tenían esos conocimientos y en especial a niños que les permite incursionar por primera vez en el mundo de la programación.

Dependiendo del modelo de arduino varían ciertas funcionalidades, tales como mayor o menor número de entradas/salidas, algunos con sensores integrados, botones, joystick e incluso con módulos de reconocimiento de voz. El entorno de desarrollo de arduino se lo puede descargar gratuitamente, desde su página oficial de acuerdo a la funcionalidad que se le vaya a dar se deberá elegir el tipo de arduino a continuación se muestra una figura en la cual se detallan algunos tipos de arduino según su modelo y características.

Modelo	Microcontrolador	Voltaje de entrada	Voltaje del sistema	Frecuencia de Reloj	Digital I/O	Entradas Analógicas	PWM	UART	Memoria Flash	Cargador	Interfaz de Programación
Arduino Due	AT91SAM3X8E	5-12V	3,3V	84MHz	54*	12	12	4	512Kb	Due	Nativa USB
Arduino Leonardo	ATmega32U4	7-12V	5V	16MHz	20*	12	7	1	32Kb	Leonardo	Nativa USB
Arduino Uno - R3	ATmega328	7-12V	5V	16MHz	14	6	6	1	32Kb	Optiboot	USB via ATmega16U2
RedBoard	ATmega328	7-15V	5V	16MHz	14	6	6	1	32Kb	Optiboot	USB via FTDI
Arduino Uno SMD (descontinuado)	ATmega328	7-12V	5V	16MHz	14	6	6	1	32Kb	Optiboot	USB via ATmega16U2
Arduino Uno (descontinuado)	ATmega328	7-12V	5V	16MHz	14	6	6	1	32Kb	Optiboot	USB via ATmega16U2
Arduino Duemilanove (descontinuado)	ATmega328	7-12V	5V	16MHz	14	6	6	1	32Kb	AtmegaBOOT	USB via FTDI
Arduino Bluetooth (descontinuado)	ATmega328	1,2-5,5V	5V	16MHz	14	6	6	1	32Kb	AtmegaBOOT	Serial Bluetooth
Arduino Pro 3.3V/8MHz	ATmega328	3,35-12V	3,3V	8MHz	14	6	6	1	32Kb	AtmegaBOOT	Cabecera compatible con FTDI
Arduino Pro 5V/16MHz	ATmega328	5-12V	5V	16MHz	14	6	6	1	32Kb	AtmegaBOOT	Cabecera compatible con FTDI
Ethernet Pro (descontinuado)	ATmega328	7-12V	5V	16MHz	14	6	6	1	32Kb	AtmegaBOOT	Cabecera compatible con FTDI
Arduino Mega 2560 R3	ATmega2560	7-12V	5V	16MHz	54	16	14	4	256Kb	STK500v2	USB via ATmega16U2
Arduino Mega 2560 (descontinuado)	ATmega2560	7-12V	5V	16MHz	54	16	14	4	256Kb	STK500v2	USB via ATmega16U2

Fig. 83 Selección del arduino a utilizar

De esta tabla y de acuerdo a nuestras necesidades, será más útil el arduino mega 2560 R3 es el que se elegirá para realizar el control de nuestro sistema.

4.3.1.1. Arduino Mega

El Arduino Mega 2560 es una placa electrónica basada en el microprocesador Atmega2560 (ficha técnica). Se puede observar en la figura 84. Tiene 54 pines digitales de entrada/salida (de los cuales 15 se pueden utilizar como salidas PWM), 16 entradas analógicas, 4 UART (hardware puertos serie), un oscilador de cristal de 16 MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, un header ICSP, y un botón de reinicio.

Contiene todo lo necesario para apoyar el microcontrolador; simplemente conectarlo a un ordenador con un cable USB o el poder con un adaptador de CA o la batería a CC para empezar.

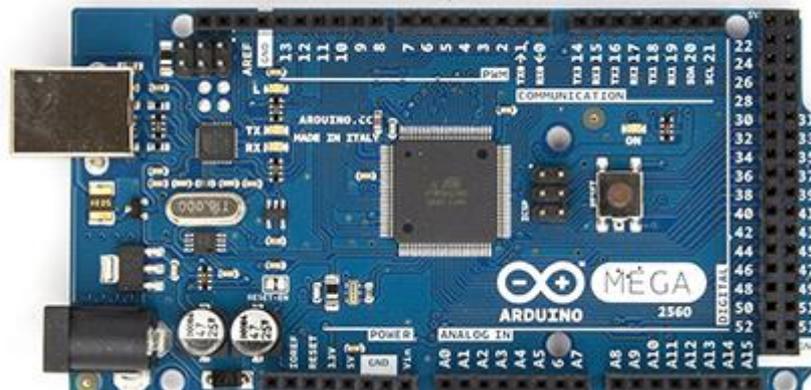


Fig. 84 Ejemplo de arduino Mega

Entre las características principales de este modelo de arduino se tiene:

- Microcontrolador ATmega2560
- Tensión de funcionamiento 5V
- Voltaje de entrada (recomendado) 7-12V
- Voltaje de entrada (límites) 6-20V
- Digital pines I / O 54(de los cuales 15 proporcionan PWM)
- Pines de entrada analógica 16
- Corriente DC por Pin I / O 40 mA
- Corriente DC de 3.3V Pin 50 mA
- Memoria Flash 256KB ,8 KB gestor de arranque
- SRAM 8 KB
- EEPROM 4 KB
- Velocidad de reloj 16 MHz

El Arduino Mega puede ser alimentado a través de la conexión USB o con una fuente de alimentación externa. La fuente de alimentación se selecciona automáticamente. La tarjeta puede funcionar con un suministro

externo de 6 a 20 voltios. Con menos de 7v la tarjeta puede ser inestable. Si se utiliza más de 12V, el regulador de voltaje se puede sobrecalentar y dañar la placa. El rango recomendado es de 7 a 12 voltios.

Los pines de alimentación son como se indica a continuación:

- VIN. El voltaje de entrada a la placa Arduino cuando se trata de utilizar una fuente de alimentación externa.
- 5V. Este pin como salida una 5V regulada desde el regulador en el tablero.
- 3.3v Un suministro de 3,3 voltios generada por el regulador de a bordo. El drenaje máximo es de 50 mA.
- GND. conexión de tierra.
- Instrucción IOREF. Este pin de la placa Arduino proporciona la referencia de tensión con la que opera el microcontrolador en caso de que se necesite.

Existen pines especializados para comunicación, interrupciones, pwm, etc., a continuación se muestras algunas de ellas:

- De Serie: 0 (RX) y 1 (TX), Serie 1: 19 (RX) y 18 (TX); Serial 2: 17 (RX) y 16 (TX); Serial 3: 15 (RX) y 14 (TX) estos pines están conectados a los pines correspondientes del ATmega2560 USB-to-TTL chips Serial.
- PWM: 2 a 13 y 44 a 46 proporciona salidas PWM de 8 bits.
- SPI: 50 (MISO), 51 (MOSI), 52 (SCK), 53 (SS) Estos pines soportan la comunicación SPI.
- LED: 13 Hay un built-in LED conectado al pin digital 13 Cuando el pin es de alto valor, el LED está encendido, cuando es bajo, está apagado.

El Mega2560 tiene 16 entradas analógicas, cada uno de los cuales proporcionan 10 bits de resolución. Por defecto utilizan como referencia 5v pero pueden utilizar el pin AREF para un voltaje diferente. El Arduino mega

se puede programar con el software de Arduino que tiene el mismo nombre y su programación es en C, el software es gratuito y se lo puede descargar gratuitamente.

Los ATmega2560 en la Arduino Mega viene precargado con un gestor de arranque que le permite cargar nuevo código a la misma sin el uso de un programador de hardware externo. Arduino Mega está diseñado de una manera que permite que pueda ser restablecido por el software que se ejecuta en un ordenador conectado. El software de Arduino utiliza esta capacidad que le permite cargar código con sólo pulsar el botón de subida en el entorno Arduino.

El Arduino Mega tiene un poli fusible reseteable que protege los puertos USB del ordenador de cortocircuitos y sobre corriente. Aunque la mayoría de los ordenadores proporcionan su Tumbaco, P; Barrionuevo, C; 2014 protección interna, el fusible proporciona una capa adicional de protección. Si hay más de 500 mA que se aplica al puerto USB, el fusible romperá automáticamente la conexión hasta que se corte o se elimine la sobrecarga.

Las funciones que interesan se muestran en la hoja de datos del microcontrolador ATmega2560.

A continuación se muestra las conexiones del arduino mega y sus funcionalidades ver figura 85.

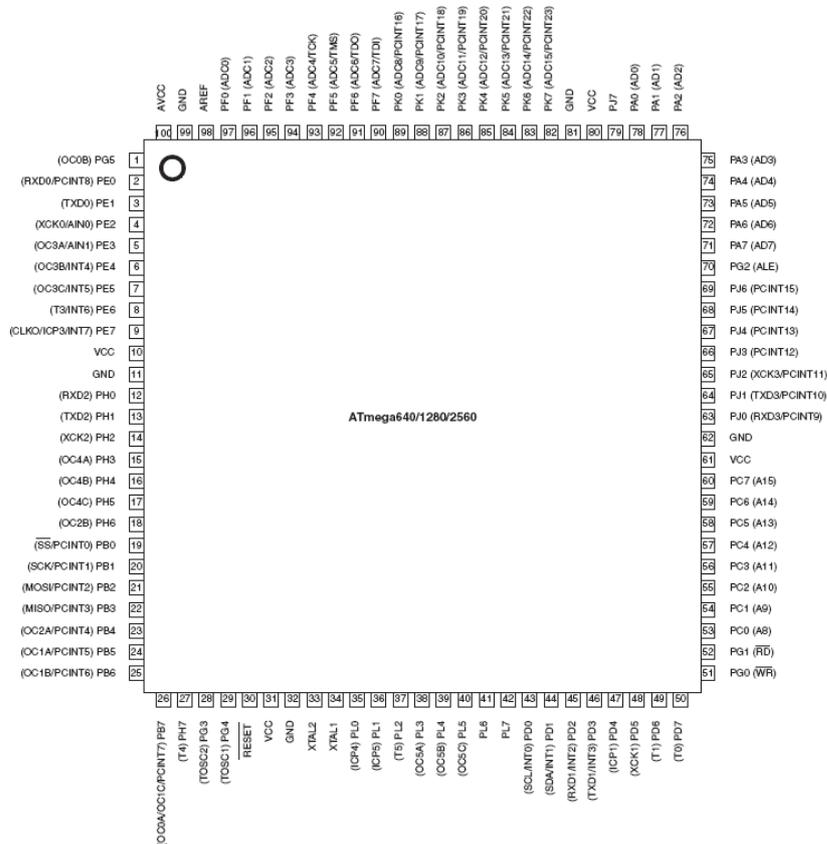


Fig. 85 Pines ATmega 2560

4.3.2. Sistemas de Comunicación

El Arduino Mega tiene integrado los pines de comunicación para poder transmitir datos con otro microcontrolador, posee pines de Tx y Rx para comunicación serial, puede utilizar comunicación I2C y también comunicación SPI adicionalmente de otras como one wire pero para estas se debe descargar las librerías adecuadas. Para la transmisión de información en el concentrador se va a utilizar comunicación serial, a continuación se detalla un poco más de su funcionamiento.

4.3.2.1. Comunicación Serial

Para la explicación se va a basar en el concepto dado por NATIONAL INSTRUMENTS (INSTRUMENTS, 2014) en el cual indica lo siguiente: La comunicación serial es un protocolo que se incluye de manera estándar en prácticamente cualquier computadora, anteriormente la mayoría de computadores poseían puertos RS232, la comunicación serial es muy utilizada para la adquisición de datos y para equipos remotos de muestreo.

Como definición precisa dice que el puerto serial envía y recibe bytes de información un bit a la vez. Aun cuando esta comunicación puede ser más lenta que un puerto paralelo la comunicación serial es mucha más sencilla y alcanza mayores distancias, como por ejemplo una especificación de la IEEE488 dice que la comunicación en paralelo el cable no puede ser mayores 20 metros mientras que la comunicación serial puede llegar a 1200 metros.

Típicamente, la comunicación serial se utiliza para transmitir datos en formato ASCII. Para esta comunicación se necesitan 3 líneas de transmisión, una referencia o tierra, el emisor y el transmisor. Gracias a que es serial se puede enviar datos por una línea al mismo tiempo que se recibe por otra, las características más importantes en esta comunicación son la velocidad de transmisión que se mide en baudios, los bits de datos, bits de parada y la paridad, para que los dos puertos se comuniquen es necesario que estas características sean iguales en ambas.

Dentro de la comunicación serial esta la comunicación RS-232, recibe este nombre debido a su conector de 25 y más comúnmente de 9 pines denominado DB-9.

El conector DB-9 mostrado en la figura 86 da un ejemplo de las conexiones usadas en el mismo.

Asignación de pins en conectores DB9

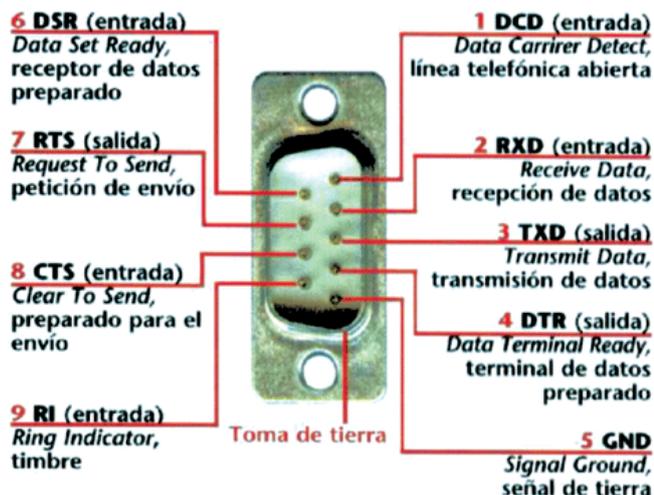


Fig. 86 Ejemplo de un conector BD9 para comunicación serial

El arduino Uno tiene un conversor serial a USB lo que permite evitar el uso del conector DB-9 como medio de comunicación entre el microcontrolador el computador, teniendo integrado lo que se muestra a continuación. Esto se observa en la figura 87.

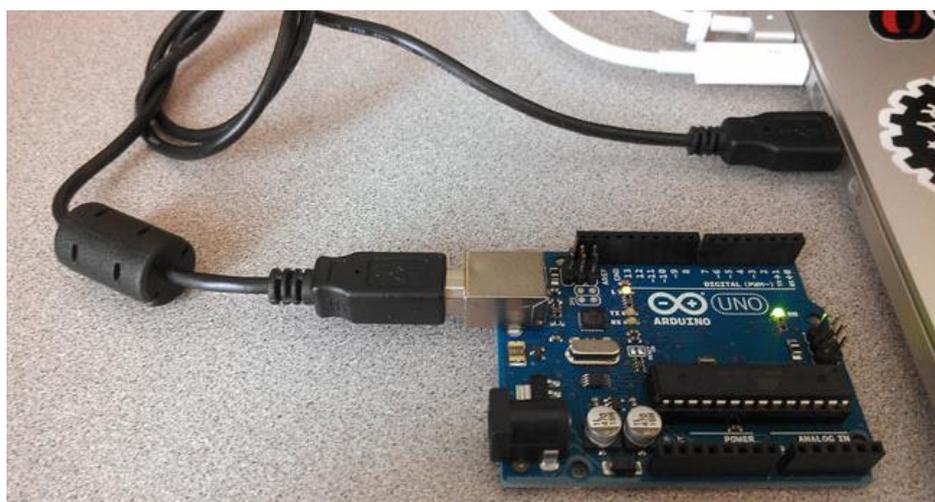


Fig. 87 Comunicación serial mediante el arduino

4.3.2.2. Comunicación Bluetooth

Es un protocolo de comunicación para dispositivos de bajo consumo y corto alcance, posibilita la transmisión entre diferentes equipos mediante un enlace por radiofrecuencia.

Tiene como objetivos principalmente

- Facilitar las comunicaciones entre equipos móviles y fijos
- Eliminar cables y conectores entre dispositivos
- Se podrían crear pequeñas redes inalámbricas

La distancia dependerá de la antena que esté conectada al dispositivo algunas bibliografías las dividen como clases

Clase	Potencia máxima permitida (mW)	Potencia máxima permitida (dBm)	Alcance (aproximado)
Clase 1	100 mW	20 dBm	~30 metros
Clase 2	2.5 mW	4 dBm	~10-5 metros
Clase 3	1 mW	0 dBm	~1 metro

Fig. 88 Diferentes alcances de dispositivos Bluetooth

El consumo de corriente por el contrario viene dado por la velocidad de comunicación del puerto serie en baudios. Las velocidades pueden ir desde 1200 – 115200 baudios por segundo. Para la utilización de los dispositivos bluetooth se debe tomar en cuenta que el método de transmisión y comunicación sigue siendo serial es decir bajo los mismo pines RX y TX y bajo las mismas condiciones mencionadas anteriormente en comunicación

serial. Para la comunicación se utilizó el módulo bluetooth que permite conectarse al arduino a continuación se muestra en la figura 91



Fig. 89 Dispositivo bluetooth para microcontroladores

La conexión para el arduino es simple y es como se muestra a continuación

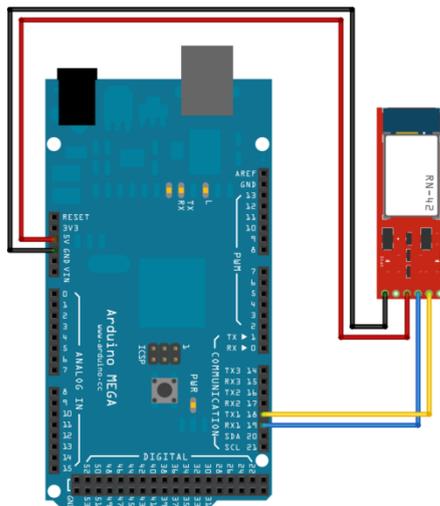


Fig. 90 Ejemplo de conexión de un bluetooth para arduino

4.3.3. Método de Control

El equipo va a tener dos métodos diferentes de realizar el seguimiento solar, el primero es controlando individualmente cada uno de los motores para así con los 2 grados de libertad poder enfocar adecuadamente el sol en la cámara de reacción. El segundo es un control automático basado en el seguimiento solar, mediante el uso de los sensores de luz antes mencionados.

4.3.4. Seguimiento Solar

Existen algunos métodos de realizar un seguidor solar, el primero es ingresando los datos de la fecha y latitud mediante un teclado, para que el microprocesador pueda realizar internamente el cómputo de los ángulos necesarios para ese día. Para que este método funcione el microprocesador debe tener, o a su vez estar conectado a, un reloj en tiempo real. Este método tiene el inconveniente de verse afectado por nubosidades que puedan existir, ya que no tiene información real del estado del día, sino únicamente de la posición en donde se encuentra el sol. Otro método muy común utilizado ampliamente en paneles solares se trata de encontrar el punto máxima potencia, es decir el punto donde debido a encontrarse perpendicular a los rayos del sol, los paneles generen la mayor cantidad de energía. Finalmente existe un tercer tipo de seguimiento que emplea LDRs como sensor principal y se basa en cambios de iluminación debido a como la sombra varía debido al movimiento del sol.

El uso de LDRs presenta ventajas sobre otros sensores como se vió en el capítulo 4.2.1. Por esta razón se emplea el tercer tipo de seguimiento, cuyo funcionamiento a detalle se explica a continuación.

Como se observa en la figura 91, para que este sistema funcione se necesita dos sensores LDRs montados sobre una superficie plana, uno junto al otro. Estos LDRs se van a encontrar separados por una placa plana, la cual va a estar perpendicular a la superficie plana en donde están montados los sensores. De esta manera la placa perpendicular va a generar una sombra dependiendo de la ubicación del sol sobre ella. Existen tres posiciones posibles del sol sobre la estructura de los LDRs. La primera es cuando el sol en su movimiento relativo, se encuentre ubicado a la derecha de la estructura. Como los rayos del sol ingresan prácticamente rectos, al

chocar contra la placa perpendicular, en una dirección inclinada, van a generar una sombra en el LDR que se encuentre en la dirección de los rayos del sol, en este caso el LDR de la izquierda. La segunda posición es cuando el sol se encuentre exactamente sobre la estructura, en donde los rayos del sol no chocan ninguna cara de la placa perpendicular, y ambos LDRs reciben igual cantidad de luz. Finalmente la tercera posición es cuando el sol se encuentre a la izquierda de la estructura y los rayos del sol choquen con una cara de la placa perpendicular, ensombreciendo el LDR a la derecha.

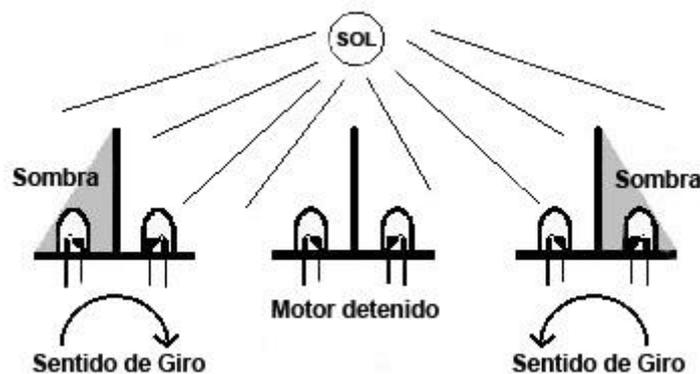


Fig. 91 Esquema de Funcionamiento Seguidor Solar

Fuente: (EnergizAr)

Al montar la estructura de los LDRs sobre la cara plana del colector, solo hay una posición en el concentrador se va a encontrar perpendicular a los rayos del sol, y es cuando estos reciban la misma cantidad de luz solar, ya que si esto no sucede significa que los rayos del sol no están llegando perpendiculares, sino en una dirección inclinada. De esta forma al medir la cantidad de luz en cada LDR y compararla con el otro, se conocerá en qué dirección se encuentran los rayos de sol, ya que si el LDR a la izquierda se encuentra en sombra, es necesario mover el sistema a la derecha y viceversa si el LDR a la derecha se encuentra en sombra el sistema debe girar a la izquierda. Como estos LDRs se encuentran conectados a un divisor de voltaje, al ensombrecerse aumentarán su resistencia, y por

consiguiente aumentarán el voltaje en el divisor, lo cual al ser medido en el microprocesador, le da información de hacia qué lado debe girar los motores.

Las dimensiones de la placa van a depender de la sombra que se desee proyectar sobre los LDRs, la cual experimental se encontró que con una longitud de 150 mm, produce la sombra necesaria que en 4 minutos, que es el tiempo de seguimiento establecido en el capítulo 3.3.1. y se consiga una diferencia de voltaje de 100mV entre los divisores de voltaje de los LDRs.

Finalmente se van a emplear 2 de estas estructuras, es decir dos pares de LDRs con su respectivo divisor de voltaje, de tal forma que queden alineados con los ejes de rotación del sistema.

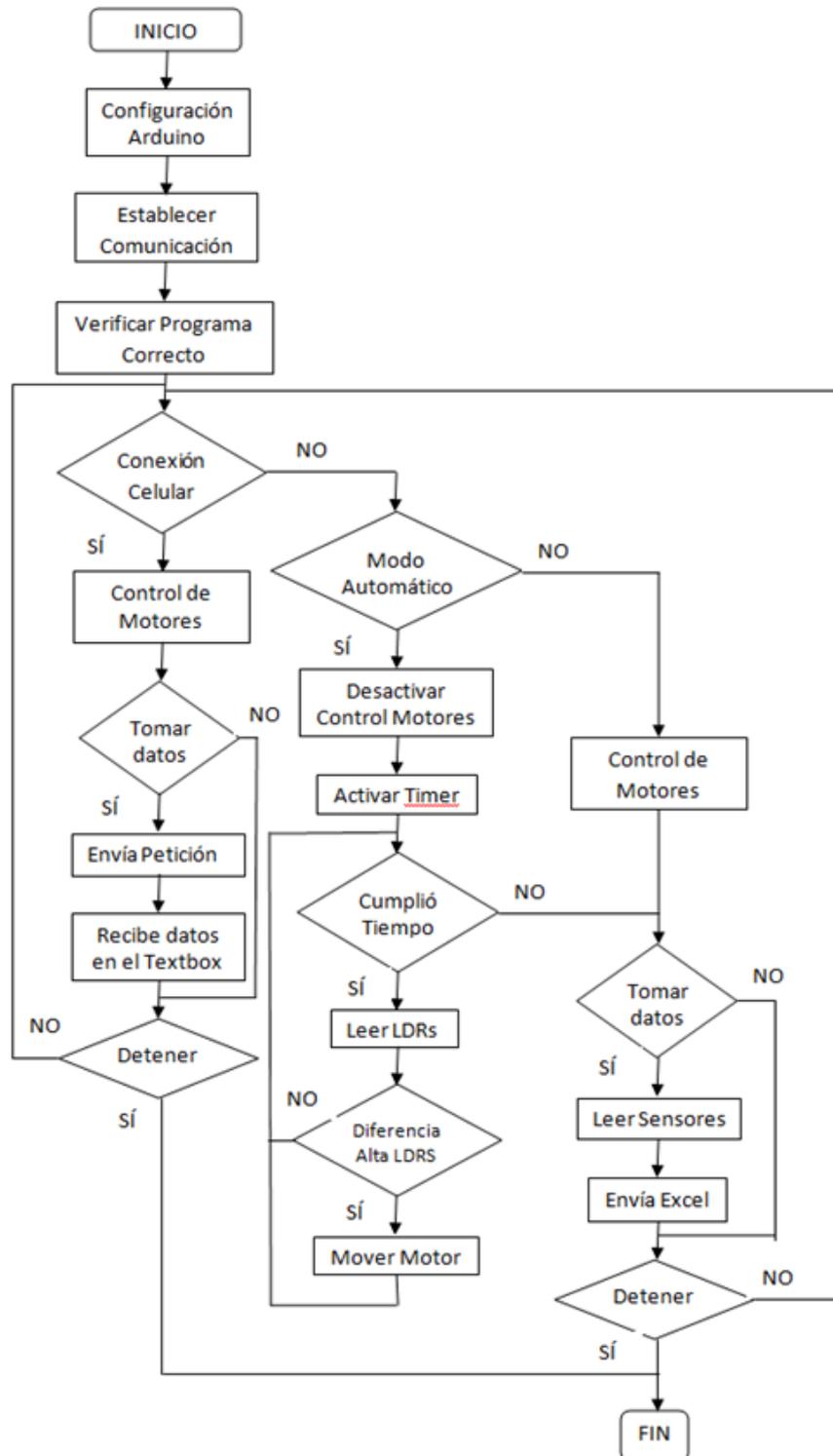
4.3.5. Programa de Control

De acuerdo al diagrama de flujo para el control del equipo se tienen los siguientes procesos:

1. Configuración de los recursos del microcontrolador, incluido pines de conexión, declaración de entradas y salidas, librerías necesarias, variables de los sensores, variables auxiliares, declaración de funciones, seteo de valores, configuración de la comunicación y demás declaraciones fuera de la subrutina.
2. Establecer comunicación con el equipo, sea con el computador mediante comunicación serial o comunicación bluetooth, o con el equipo móvil mediante comunicación bluetooth.

3. Verificar que la conexión se haya realizado desde la aplicación correcta en el celular, o desde el programa establecido en la computadora.
4. Lectura de los diferentes sensores, para los sensores de luz ldrs, se obtiene la lectura de los puertos conversores analógico digital. De igual forma para el sensor de radiación que entrega una señal analógica. Para los sensores de temperatura se envían las direcciones de cada sensor dallas ds18b20 y se pide la lectura de la temperatura. Finalmente para la termocupla se pide mediante protocolo SPI, la lectura de la temperatura en el foco.
5. Control de los motores, una vez se recibe la orden de control, se genera una señal digital de PWM, para controlar la fuerza del motor, la cual permanece por un tiempo determinado y luego vuelve a su estado original. Esto se realiza para evitar daños al equipo si se pierde la comunicación en cualquier punto.
6. Establecer el modo automático, mediante la orden adecuada, permite que la información de los ldrs sea procesada, y determine cual divisor de tensión ha aumentado su voltaje, lo que significa que dicho LDR se encuentra en sombra. Esto permite mandar la orden adecuada a los motores, y habilita un timer que repetirá el proceso cada cierto tiempo determinado.
7. Envío de datos para su procesamiento en excel, debido a que la comunicación debe ser lo más rápida posible, y ser capaz de ser separada y entendida por una aplicación diferente, se codifica la información que se envía desde el arduino, de tal forma que un programa en la computadora decodifique esa información y la reproduzca en Excel de forma ordenada.

El esquema de control del microprocesador arduino mega, va a ser de la siguiente manera:



4.3.6. Programas Adicionales

Para que la información recolectada por el equipo sea capaz de ser procesada de una mejor forma, y el equipo sea lo más seguro para el operario, se emplean programas adicionales que permiten tanto, una mayor facilidad en el control del equipo, como una comunicación entre diferentes programas en el computador.

4.3.7. Programas Android

Para realizar una aplicación en Android se debe partir primero diciendo que Android es un sistema operativo inicialmente creado para teléfonos móviles, que al igual que Symbian y Blackberry OS lo que hacían era un entorno de manejo de los recursos del teléfono. Lo que hace diferente a Android es que está basado en Linux, un núcleo de sistema operativo libre, gratuito y multiplataforma. Lo que permite que las personas puedan programar, modificar y crear variaciones del mismo y al mismo tiempo crear aplicaciones de forma gratuita.

El sistema operativo permite programar en una variación de Java llamada Dalvik, que en su entorno permite usar todas las funciones del teléfono tales como el GPS, las llamadas, el acelerómetro etc, en el mismo lenguaje de Java.



Fig. 92 Símbolo Internacional de Android

Para la realización de aplicaciones se han diseñado varias plataformas que permiten realizar esto no solo en Android sino también en IOS, para facilidad y fácil acceso se utilizará App Inventor , una plataforma de desarrollo gratuita que permite realizar la programación de manera sencilla y rápida, obviamente con alguna de sus limitantes , pero para la aplicación que se está tratando de desarrollar es suficiente los recursos que posee.

4.3.7.1. App Inventor

App Inventor es una herramienta de programación basada en programación de bloques que permite incluso a principiantes construir aplicaciones que son funcionales y prácticas. Este lenguaje que es mucho más sencillo de entender y realizar permite crear aplicaciones complejas en mucho menos tiempo , fue inicialmente desarrollada por el profesor Hal Abelson, App Inventor se ejecuta como un servicio web administrado por personal del centro de aprendizaje móvil del MIT y colaboración del Laboratorio de ciencia computacional e inteligencia artificial del MIT (CSAIL), Esta aplicación permite acaparar varias audiencias que son la educación, investigación, desarrollo de productos, juegos y exploradores y compromiso con la comunidad.



Fig. 93 Pilares Fundamentales App Inventor

Para iniciar una aplicación por medio de app Inventor se necesita inicialmente una cuenta de google en Gmail, debido a que como se mencionó anteriormente es un servicio web por lo cual la programación es también en línea.

Google accounts

The application MIT AppInventor Version 2 is requesting permission to access your Google Account.

Please select an account that you would like to use.

● paulumbaco@gmail.com

Google is not affiliated with the contents of MIT AppInventor Version 2 or its owners. If you sign in, Google will share your email address with MIT AppInventor Version 2 but not your password or any other personal information.

[Sign in to another account](#)

Remember this approval for the next 30 days

©2011 Google - [Google Home](#) - [Terms of Service](#) - [Privacy Policy](#) - [Help](#)

Fig. 94 Ingreso a la cuenta de google

En el entorno de programación se utilizará el App Inventor 2 que tiene las mismas funciones solo algo más de versatilidad a la hora del uso de la programación debido a que el entorno funciona en línea inmediatamente y en el App Inventor se debe esperar a que se descargue la aplicación para poder realizar la programación. Su entorno de diseño es como se muestra en la figura 95.

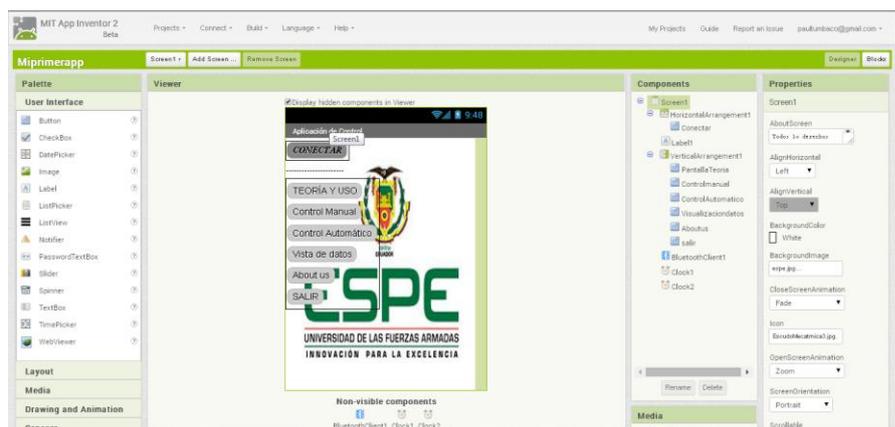


Fig. 95 Página de diseño de páginas de aplicación

Como se muestra en la figura 95, se puede realizar el diseño de la app, teniendo en cuenta número de pantallas, colores, imágenes tipos de letras, sensores a usar etc., es decir en esta pantalla se define la forma visual de nuestra app.

El entorno de programación es un diagrama de bloques como anteriormente se explicó en el cual influye mucho como se desea la visualización y la funcionalidad de cada elemento elegido en la pantalla de diseño. A continuación se muestra un ejemplo de como se muestra la pantalla de programación, ver figura 96 a continuación.

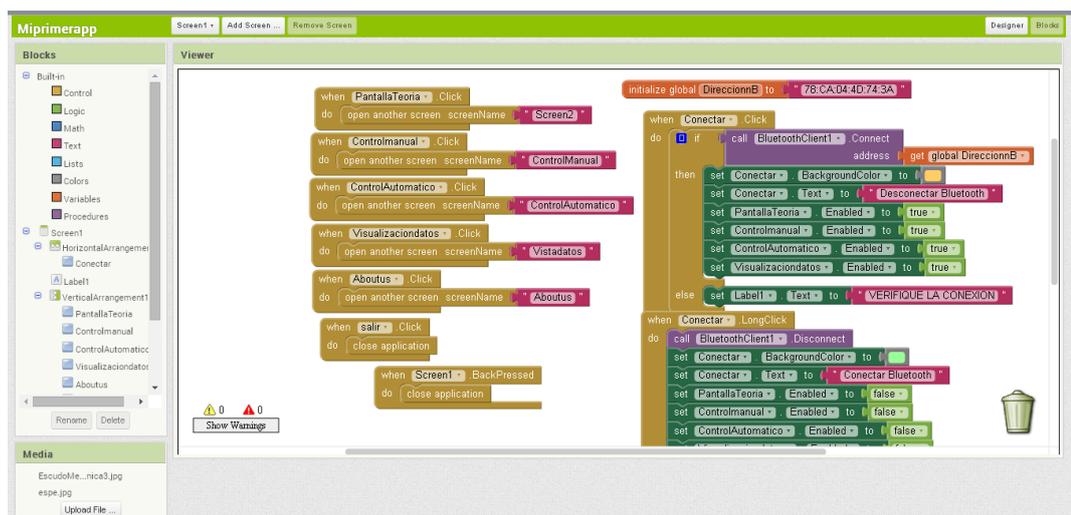


Fig. 96 Pantalla de Programación

4.3.8. Visual Studio

Para que la información tomada de los sensores en el microprocesador, y enviada por comunicación bluetooth, sea capaz de ser entendida, se emplee un programa adicional que permita realizar esta función. Este programa es Visual Studio el cual no es propiamente un programa de comunicación inteligente o de manejo de datos, sino que es un programa de desarrollo de programas en Microsoft Windows.

"Microsoft Visual Studio es un entorno de desarrollo integrado (IDE, por sus siglas en inglés) para sistemas operativos Windows. Soporta múltiples lenguajes de programación tales como C++, C#, Visual Basic .NET, F#, Java, Python, Ruby, PHP; al igual que entornos de desarrollo web como ASP.NET MVC, Django, etc., a lo cual sumarle las nuevas capacidades online bajo Windows Azure en forma del editor Monaco.

Visual Studio permite a los desarrolladores crear aplicaciones, sitios y aplicaciones web, así como servicios web en cualquier entorno que soporte la plataforma .NET (a partir de la versión .NET 2002). Así se pueden crear aplicaciones que se comuniquen entre estaciones de trabajo, páginas web, dispositivos móviles, dispositivos embebidos, consolas, etc." (Wikipedia)

Entonces se va a diseñar una aplicación, que permita recibir datos por bluetooth, y procesar la información recibida, para almacenarla en una hoja de cálculo. Las aplicaciones en Visual Studio permiten la generación de diferentes ventanas, con diferentes elementos tales como botones, menús, selectores y demás elementos, basados en lenguaje Visual Basic.

La primera ventana, para un entorno amigable con el usuario va a ser una ventana de información como se muestra en la figura 97.



Fig. 97 Ventana de Inicio

Como se observa en esta ventana se encuentran dos botones, los cuales permiten, el primero comenzar a utilizar el equipo, y el segundo llevar al usuario a una ventana que contiene más información sobre el proyecto. Una vez se pulsa el botón de comenzar este dirige a la ventana de la figura 98. Esta ventana posee tres botones y una caja de selección.

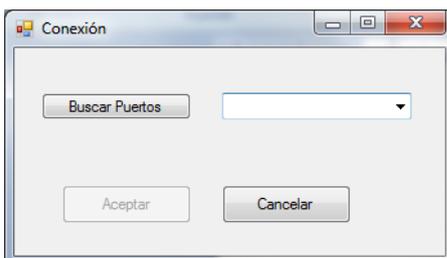


Fig. 98 Pantalla de Conexión

El botón de Aceptar se encuentra deshabilitado al ingresar en esta ventana. El botón de Cancelar retorna a la ventana de inicio. El botón llamado: "Buscar Puertos" envía la orden a la computadora de buscar todos los puertos de conexión disponibles, incluyendo el puerto Bluetooth, si es que este existe. Una vez se ha pulsado ese botón, se va a recibir el siguiente mensaje, si existen puertos de comunicación disponibles.

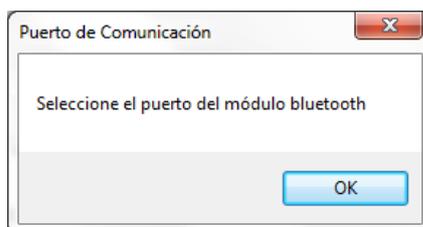


Fig. 99 Ventana De Mensaje

En caso de no encontrarse ningún puerto disponible se genera un mensaje de error como el siguiente

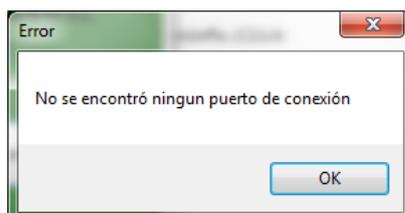


Fig. 100 Ventana De Error

Una vez se ha aceptado el mensaje se va a desplegar la lista de puertos disponibles en la caja de selección como se ve en la figura 101.

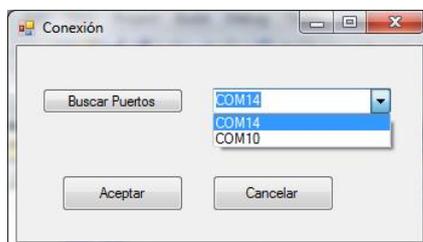


Fig. 101 Ventana De Conexión con Lista de Puertos Disponibles

De estos puertos se debe escoger el puerto en donde se encuentra conectado el Arduino, o en su defecto el puerto virtual del bluetooth. Esta acción habilita el botón de aceptar, para que envíe la información del puerto escogido, y permita comunicar la computadora con el microprocesador.

Una vez se ha pulsado el botón de "Aceptar" este dirige a la ventana de control de la figura 102.

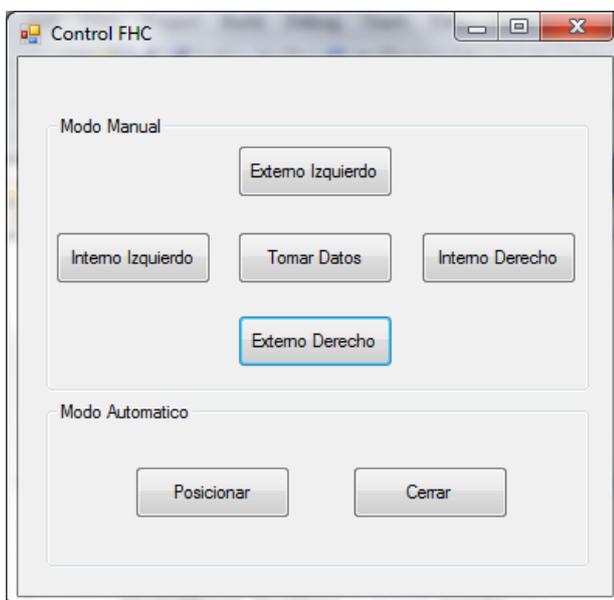


Fig. 102 Ventana De Control

Esta ventana es la que permite realizar el control del equipo, tanto de una forma manual, como de una forma automática. Para la forma manual se encuentran todos los botones dentro del grupo "Modo Manual". Los botones llamados "Externo" envían órdenes al Arduino para que este genere el PWM, en los pines conectados a los optoacopladores que dan señal al puente H del motor externo. Las palabras Derecho e Izquierdo señalan el sentido de giro del motor que recibe la señal en el puente H. Los botones llamados "Interno" a su vez envían órdenes al Arduino para que este genere el PWM, en los pines conectados a los optoacopladores que dan señal al puente H del motor interno. El botón llamado Tomar Datos genera el menú de selección de archivos de Microsoft Windows. Se escoge entonces el archivo donde se van a almacenar los datos, un archivo llamado "Toma de Datos", el cual se presenta en la figura 103.



Fecha:		21/11/2014		Registro de Datos			
Horas	Minutos	Segundos	Temp Ambiente	Temp Concentrad	Temp Foco	Irradiación	
hr	min	segs	° C	° C	° C	W/m ²	
11	43	49	23	26	26	717	
11	43	51	23	26	27	738	
11	43	53	22	26	26	852	
11	43	55	22	26	27	759	
11	43	57	22	26	26	837	
11	43	59	22	26	26	723	
11	44	0	22	26	27	816	
11	44	2	22	27	27	801	
11	44	4	22	27	26	537	
11	44	6	22	27	27	633	
11	44	8	22	27	27	879	
11	44	10	23	27	27	765	

Fig. 103 Libro Excel de Almacenamiento de Datos

Esto se realiza mediante la función "Microsoft.Office.Interop" la cual permite acceder a las funciones de Microsoft Excel desde una aplicación en Visual Studio. Este libro abierto va a recibir automáticamente los datos de la hora y fecha tomados del equipo, y los datos de los sensores de temperatura ambiente, en el concentrador y en el foco, además de la irradiación medida, enviados por el microprocesador, y los va a organizar de forma que sea accesible y fácil de entender por el usuario. El libro de Excel de almacenamiento no interfiere con el control del equipo desde la aplicación de Visual Studio, por lo que si se pulsa cualquier botón de control manual, el equipo va a cumplir con la orden enviada.

Una vez el botón de "Tomar Datos" se ha pulsado su nombre cambia a "Finalizar" de tal forma que el mismo botón al ser nuevamente pulsado envíe una señal al arduino para que detenga el envío de los datos de los sensores, y se pueda almacenar esa información en un nuevo libro de Excel.

En el otro grupo de botones llamado "Modo Automático", se tiene 2 botones. El primero llamado "Posicionar" y el segundo llamado "Cerrar". El botón de posicionar, envía la orden al microprocesador para que calcule la diferencia de voltajes entre los divisores de voltaje unidos a cada LDR, para que dependiendo de cual es mayor, envíe la orden adecuada de movimiento a cada motor. Esta acción se va a repetir cada 4 minutos, que es el tiempo de corrección establecido en el capítulo 3, de forma automática. Dentro del arduino se encuentra programada la orden de verificar el nivel de luminosidad presente, ya que si este no ha superado cierto umbral, significa que no existe radiación suficiente para realizar correctamente el experimento, y como medida de seguridad al pulsar el botón de "Posicionar" no realiza ninguna acción.

Una vez se ha pulsado el botón de "Posicionar" se deshabilitan los botones del grupo "Modo Manual", ya que el movimiento de los motores se realiza automáticamente. También al pulsar el botón éste cambia de nombre a "Detener" para permitir que cuando se lo pulse nuevamente ahora envíe una señal al microprocesador, para salir del "Modo automático", y habilitar nuevamente los botones del grupo "Modo Manual".

Finalmente el botón "Cerrar", en cualquier momento que es pulsado cierra la ventana de control, envía ordenes al arduino para detener todos los procesos que se estén realizando y regresarlo a su estado original y termina la comunicación entre la computadora y el arduino cerrando el puerto de la computadora.

4.3.9. Visualización de datos

Los datos medidos por los sensores y enviados a la computadora o al celular, pueden ser observados de diversas maneras. Esto se realiza para poder monitorear la información desde diferentes puntos, conocer en todo momento el estado del equipo, facilitar al usuario el control del mismo, y en caso de duda ayuda al usuario a determinar si existen errores en los sensores, o a su vez en la comunicación en el envío de datos. Por estos motivos se emplearon algunos métodos de visualización de datos.

El primer método consiste en visualizar los datos a medida que estos se van generando en el reporte en Excel, como se describió en el numeral anterior. Sin embargo como todos estos datos se van generando en tiempo real y se van acumulando uno tras otro puede resultar confuso conocer el estado actual del equipo, y da cabida a errores humanos. Por este motivo se presentan otras opciones de visualización.

4.3.9.1. Visualización en LCD

La opción más eficiente para conocer el estado del equipo, es el empleo de una pantalla LCD, la cual muestre al usuario toda la información que necesita conocer al momento. Esta información es: Estado de los sensores de luz, temperaturas del ambiente, concentrador y foco, e irradiación medida.

"Una pantalla de cristal líquido o LCD (sigla del inglés liquid crystal display) es una pantalla delgada y plana formada por un número determinado de píxeles en color o monocromos, colocados delante de una fuente de luz o reflectora." (Wikipedia). En electrónica una pantalla muy comúnmente utilizada es la pantalla LCD 16X2, la cual como su nombre lo indica, posee 16 columnas y 2 filas. En cada celda de esta matriz se puede presentar un caracter de los establecidos en los Caracteres ASCII.

Sin embargo esta pantalla resulta insuficiente a la hora de presentar mucha información al mismo tiempo, ya que esta pantalla sí puede presentar mucho información a diferentes tiempos en un ciclo. Por esta razón se optó por una pantalla similar de mayor tamaño, siendo la escogida la pantalla LCD 16X4, la cual como su nombre indica, posee 16 columnas y 4 filas en las que representar información.

En la figura 104 se observa el número de pines que poseen este tipo de pantallas LCD, y cuáles son los pines que deben conectarse al microprocesador. La información de los pines de la pantalla LCD se resumen a continuación en la tabla 12.

El esquema de conexión para una pantalla LCD es la siguiente.

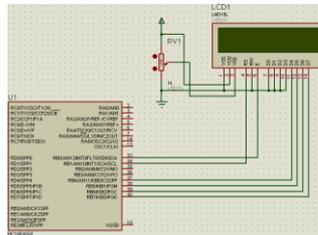


Fig. 104 Esquema de Conexión Pantalla LCD

Fuente: Tumbaco, P; Barrionuevo, C; 2014

Tabla 17. Pines Pantalla LCD.

Pines	Nombre	Significado	Conexión
1	Vss	GND, Tierra	Se conecta a tierra GND
2	Vdd	V+ Voltaje de alimentación	Se conecta a Voltaje 5V
3	Vee	Determina el contraste de la pantalla	Se conecta a un voltaje 0-5 V
4	RS	Selección del Registro	Señal del microprocesador
5	RW	Permite la lectura o escritura de datos	Se conecta a tierra GND
6	En	Enable	Señal del microprocesador
7	D0	Data 0, Se utiliza solo en 16 bits	Se conecta a tierra GND
8	D1	Data 1, Se utiliza solo en 16 bits	Se conecta a tierra GND
9	D2	Data 2, Se utiliza solo en 16 bits	Se conecta a tierra GND
10	D3	Data 3, Se utiliza solo en 16 bits	Se conecta a tierra GND
11	D4	Data 4, Bus de datos	Señal del microprocesador
12	D5	Data 5, Bus de datos	Señal del microprocesador
13	D6	Data 6, Bus de datos	Señal del microprocesador
14	D7	Data 7, Bus de datos	Señal del microprocesador
15	Led +	Terminal Positivo Led de luz de fondo	Se conecta a Voltaje 5V
16	Led -	Terminal Negativo Led de luz de fondo	Se conecta tierra GND

Como se observa en la tabla 17, la pantalla LCD requiere la conexión de 6 de sus terminales a salidas digitales del microprocesador, para su funcionamiento adecuado. Mientras que las demás señales se pueden conectar desde una fuente externa.

En la figura 105 se puede ver el resultado final de los datos presentados en pantalla, y la distribución de información dentro de sí.



Fig. 105 Pantalla de Visualización

4.3.10. Visualización Aplicación

El control de los motores para el seguimiento solar se lo realizara desde la aplicación para lo cual se tiene una pantalla de selección en la cual existe la opción de conectar, Teoría y Uso, control manual y automático, visualización de datos y la opción de salir. Esto se observa en la figura 106.



Fig. 106 Pantalla de inicio de la aplicación

Una vez conectados se podrá visualizar las pantallas, la primera es Teoría y uso en el cual indica la manera correcta de utilizar la aplicación y el concentrador y muestra el cálculo necesario para entender rápidamente el experimento.

La pantalla Modo de Control muestra una opción de Norte, Sur, Este y oeste que pueden ser controlados por el usuario de manera de buscar la mejor localización del foco. Adicionalmente tiene un botón de Stop que permite parar en cualquier momento, el botón ir a Datos permite ir rápidamente a la pantalla de visualización de datos para empezar a observar los datos que se están generando en ese momento.

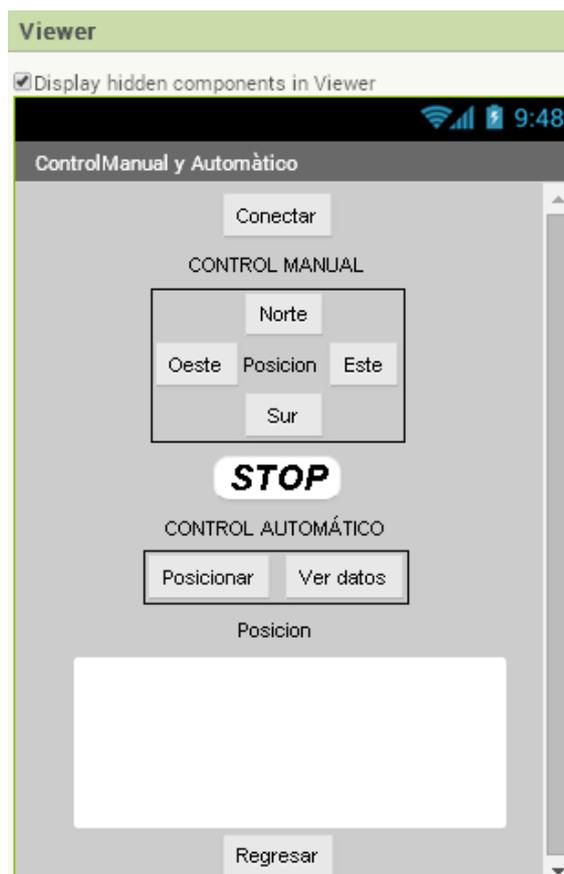


Fig. 107 Pantalla de Control

La pantalla de control está diseñada de tal forma que me permite únicamente presionar el botón “posicionar” y el concentrador automáticamente trata de conseguir la posición más perpendicular al sol. También tiene un botón de Stop que permite parar en cualquier momento y el botón de visualización de datos que muestra en un text box los datos impresos cada vez que presione el botón ver datos. La pantalla visualización de datos permite observar los datos de Temperatura en los tres puntos a tomar en cuenta, la irradiancia, la temperatura en la parte superior del concentrador, la temperatura ambiente y la temperatura generada en el foco del concentrador.

Finalmente existe la pantalla “About us” que visualiza datos de los creadores y el botón salir que permite la salida de la aplicación.

4.3.11. CIRCUITO FINAL

Una vez que se han establecido todos los elementos eléctricos, electrónicos y de control del equipo, es necesario que todos estos elementos se agrupen en un solo sistema completo para el equipo. El primer paso para esto consiste en realizar todas las conexiones necesarias para el funcionamiento del arduino, sensores, puente H y módulo bluetooth. Para tal motivo se va a realizar todas las conexiones pertinentes en el software Isis 7.8, el cual permite realizar dichas conexiones de forma ordenada y comprobar que todas las conexiones se realicen.

La primera conexión a realizarse es la energización de todo el sistema, incluidos motores Dc, Arduino, sensores y módulo bluetooth.

En la figura 108 se observa cómo se realiza esta energización y el uso de filtros capacitivos para reducir el ruido eléctrico.

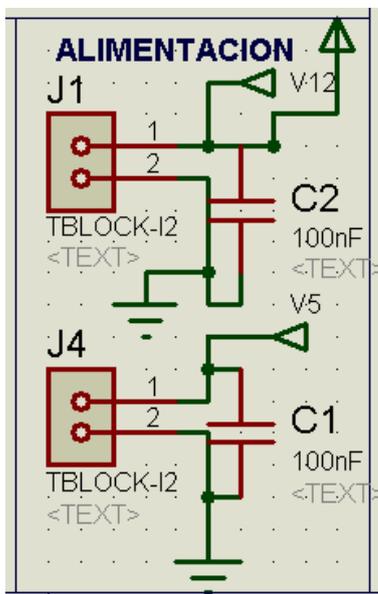


Fig. 108 Esquema Isis Conexión de Alimentación

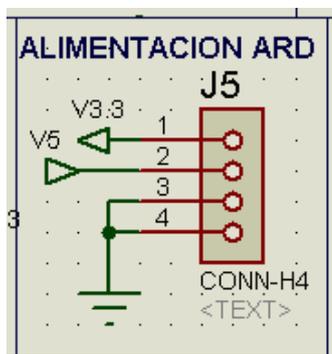


Fig. 109 Esquema Isis Conexión de Alimentación Placa Arduino

Después es necesario la conexión de la energía a los pines de arduino para que este se energice. Esto se realiza como se ve en la figura 109.

Luego se realiza la conexión del puente H para el control de los motores. Esto se ve en la figura 110.

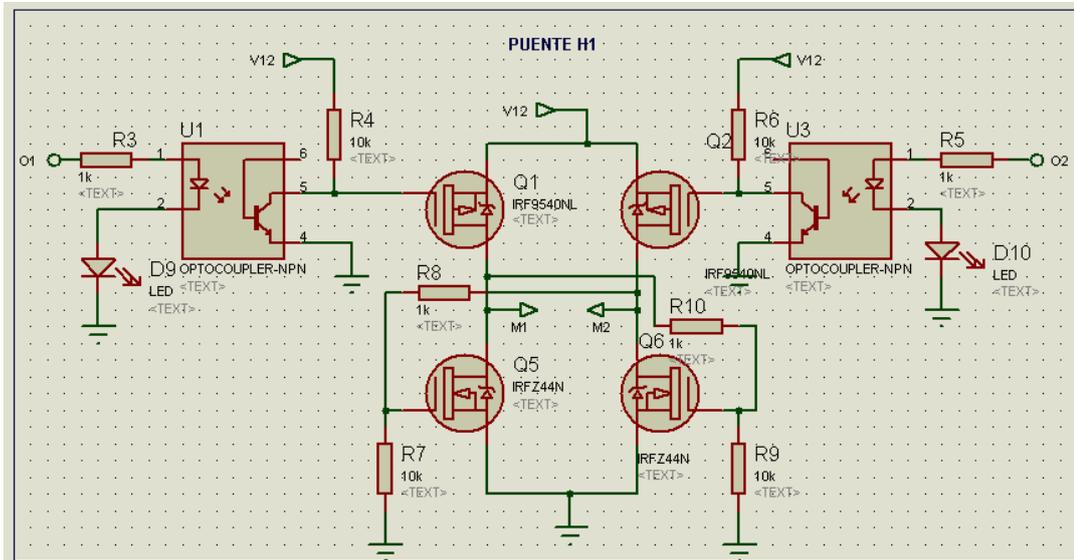


Fig. 110 Esquema Isis Puente H

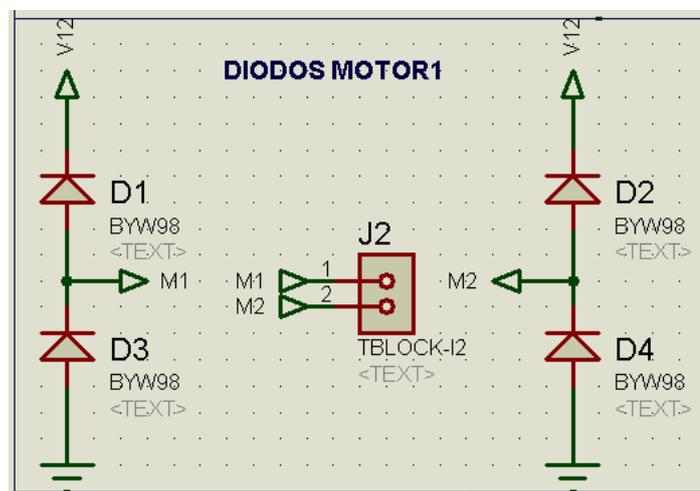


Fig. 111 Esquema Isis Diodos Antiretorno.

En el capítulo 4.1.2 se especificó la importancia de un esquema de diodos en antiparalelo, como protección para los motores.

Este esquema es el de la figura 112, en el cual se aprecia que los diodos se encuentran opuestos al sentido de circulación normal, que va de voltaje a tierra.

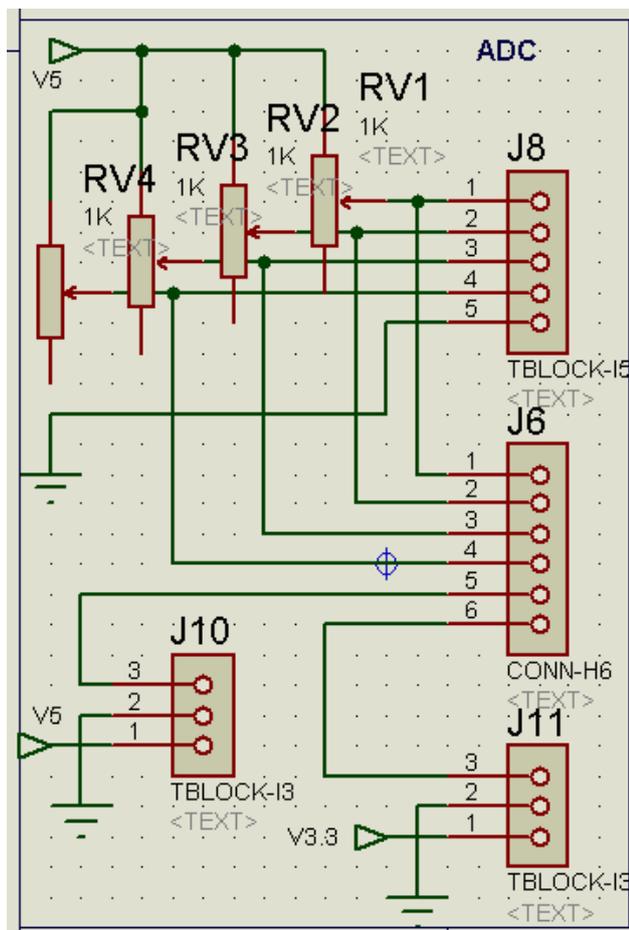


Fig. 112 Esquema Isis Puertos ADC

En la figura 113 se puede ver la conexión a realizarse en los puertos conversores analógico digital. En donde para los cuatro primeros puertos se han adicionado potenciómetros de precisión necesarios para la calibración de los LDR en su respectivo divisor de voltaje.

Estos LDR se conectan mediante borneras, en tanto que uno de sus pines se encuentra conectado directamente a tierra para completar el divisor de voltaje.

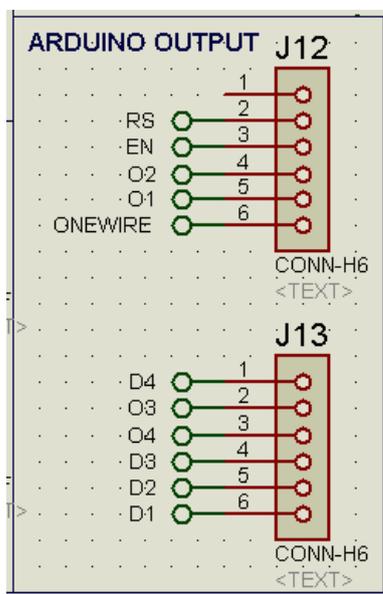


Fig. 113 Esquema Isis Salidas del Arduino

En la figura 113 se realiza la conexión de las salidas digitales del arduino a espadines que servirán, para que la placa funcione como un shield de arduino. Un shield de Arduino es una placa cuyo tamaño y disposición de pines permite que se instale fácilmente sobre arduino y cumpla un fin específico.

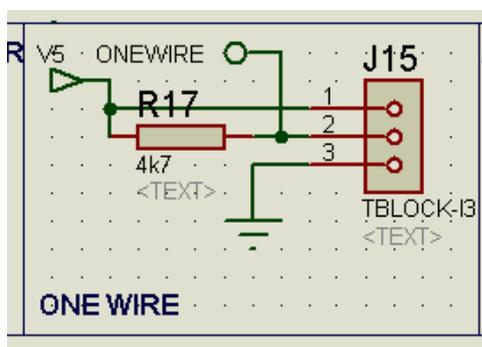


Fig. 114 Esquema Isis Sensores One-Wire

Como se dijo en el capítulo 4.2.3.2, los sensores Dallas ds18b20, requieren de una resistencia de 4,7 K Ohms, entre voltaje de alimentación y señal para funcionar, tal y como se ve en la figura 113.

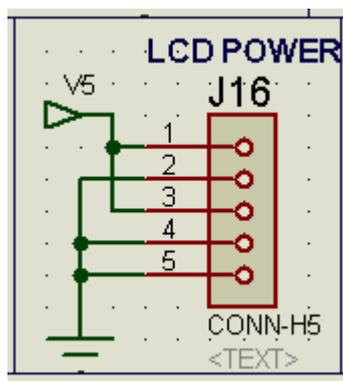


Fig. 115 Esquema Isis Energía LCD

De la tabla 12 de información de los pines de la pantalla LCD, se conoce las conexiones que se deben realizar con una fuente externa para el funcionamiento de la pantalla LCD. En la figura 116 se puede ver el esquema final de conexión.

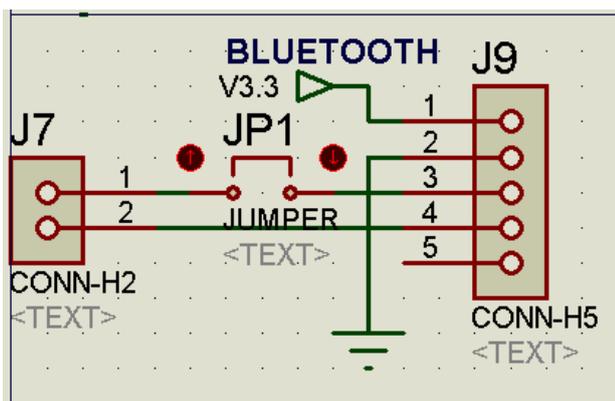


Fig. 116 Esquema Isis Módulo Bluetooth

Finalmente en la figura 116 se muestra el esquema de energización y conexión necesaria para el módulo bluetooth. Se nota aquí la existencia de un jumper conectado al tercer pin del zócalo para el módulo bluetooth. Esto

se debe a que ahí se encuentra conectado el pin tx del módulo, el cual se conecta al pin Rx , es decir el pin 0 en el microprocesador. Esto es un problema debido a que si existen conexiones en dicho pin, no se puede realizar la carga de un nuevo programa en el arduino. Por ese motivo se opto por emplear un jumper que permita desconectar dicho pin, sin la necesidad de retirar toda la placa shield.

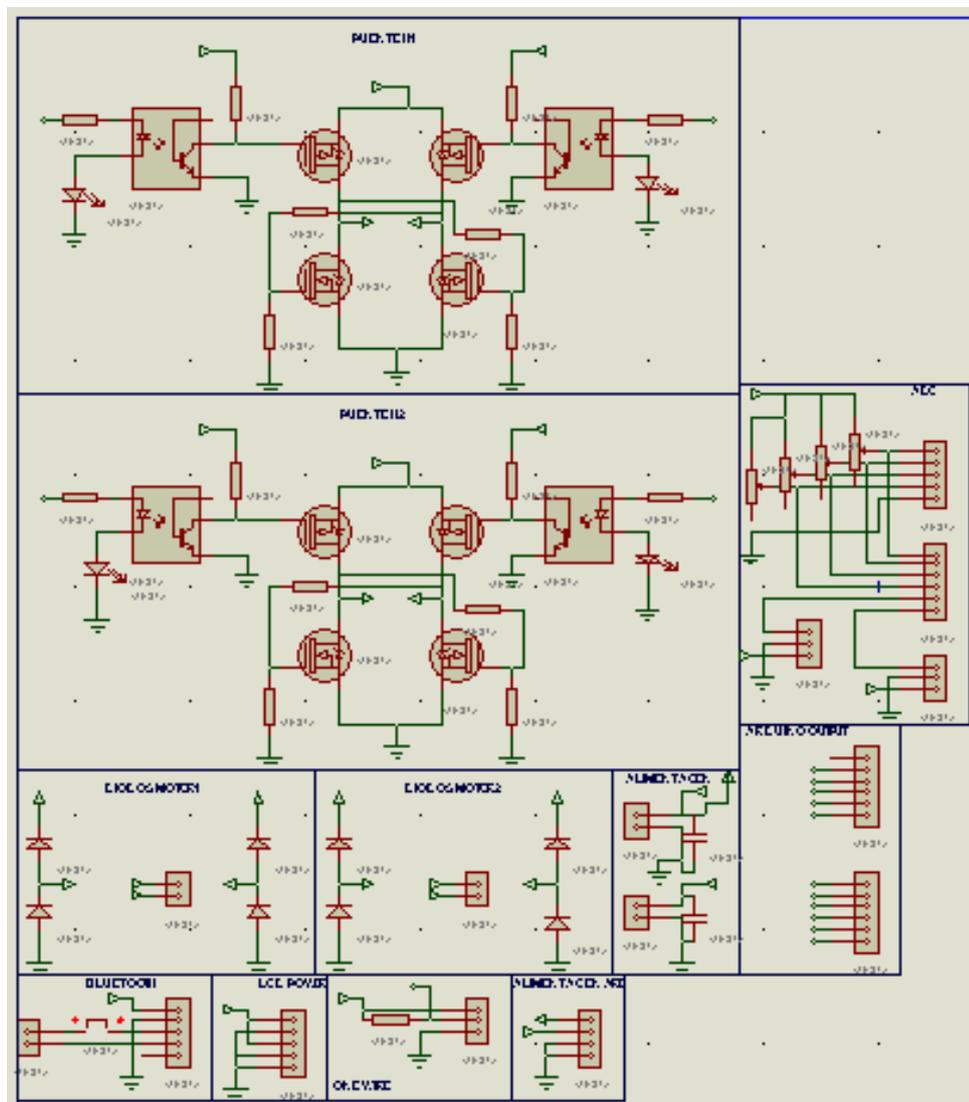


Fig. 117 Esquema Isis Total

Una vez que todas las conexiones necesarias se han realizado y verificado, se procede a enviar este archivo al software ARES 7.8 el cual va a permitir realizar una placa PCB, con los elementos y conexiones que se enviaron. Después de haber posicionados los elementos de acuerdo a las normas técnicas y ruteado las pistas necesarias se obtiene el circuito final listo para ser impreso.

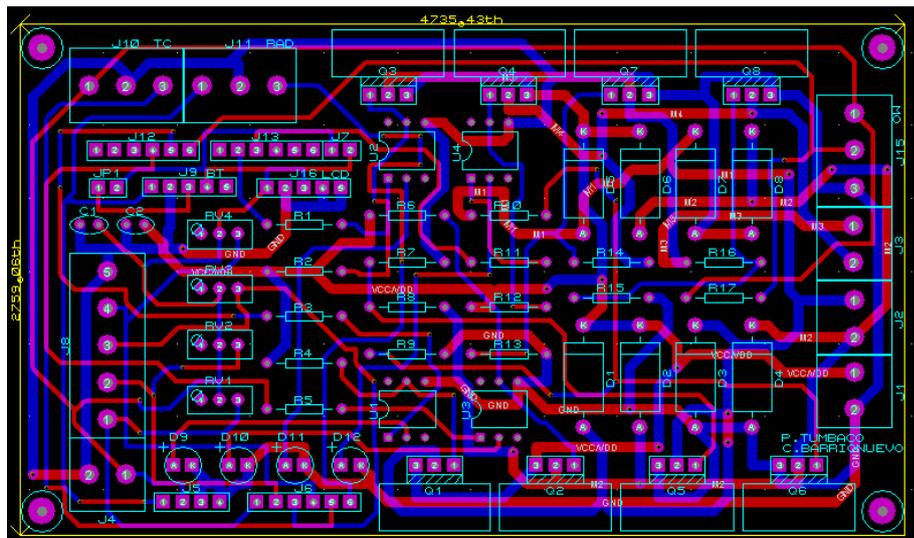


Fig. 118 Circuito Placa Total Ares

La placa final diseñada se puede apreciar en la figura 118. Y su respectiva simulación en la figura 119.

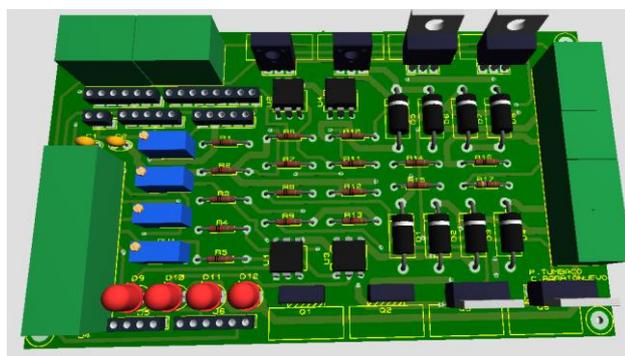


Fig. 119 Circuito Placa Total Simulado

Después de enviar el diseño a un lugar especializado, se quema la placa, y se esmalta con un barniz especial para evitar daños a la misma. La placa se puede ver en la figura 120.

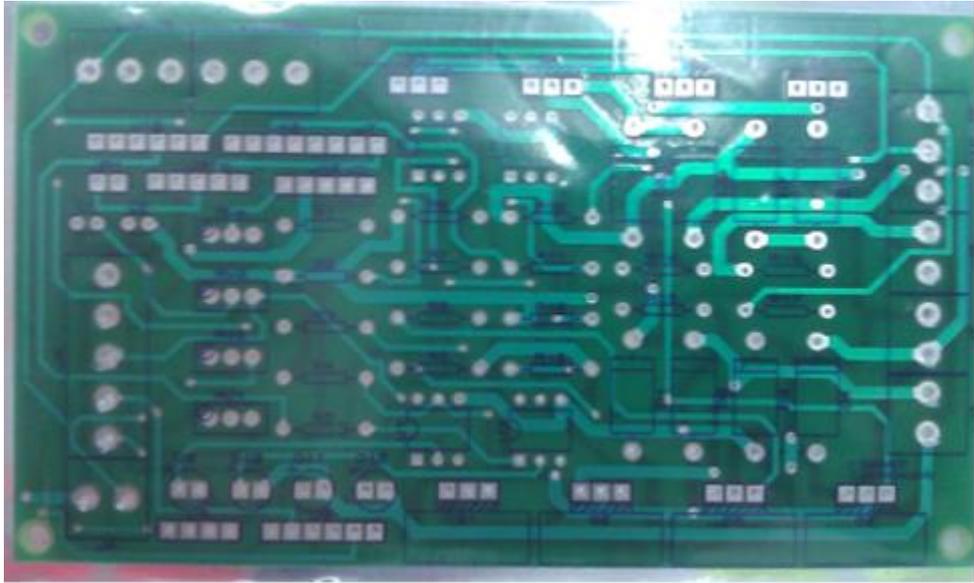


Fig. 120 Circuito Placa Barnizada

Finalmente se sueldan todos los elementos del circuito, y se instala la placa sobre el Arduino Mega, junto con todas las borneras y cables de conexión. El resultado final se observa en la figura 121



Fig. 121 Circuito Finalizado.

CAPÍTULO 5

PRUEBAS Y RESULTADOS

5.1. OPERACIÓN Y FUNCIONAMIENTO

El capítulo a continuación contiene los resultados obtenidos, tabulados y graficados en curvas de radiación, temperatura focal y temperatura ambiente, adicionalmente se analiza el comportamiento de la temperatura en la cámara de reacción, al emplear diversas acciones con el equipo, y finalmente el comportamiento de acero con diversos tipos de pinturas en la superficie.



Fig. 122 Equipo de prueba

5.1.1. Consideraciones Iniciales

La calibración de los sensores de temperatura se la realizo con un pirómetro laser, mientras que para el sensor de radiación global se la realizo con un piránometro DAVIS ya instalado en el laboratorio de energías renovables y que utiliza un software propio para mediciones en una mini estación ya instalada en el mismo laboratorio.

El equipo está diseñado para ser capaz de entrar en funcionamiento en cualquier tipo de clima, sin embargo para realizar ensayos de fotohidroconversión, se deben tomar en cuenta que para la realización del experimento es necesario que la radiación directa sobrepase los 600 W/m^2 o que este bordeando por este valor, la razón es debido a que con radiaciones directas muy bajas como 300 o 400 w/m^2 lo que se obtiene generalmente en el ambiente es que está nublado y generalmente una mañana fría y algo oscura.

Además se debe considerar el factor de la época del año, ya que si bien en el Ecuador no existen estaciones marcadas, la época del año si resulta importante en el clima en general. Las pruebas aquí realizadas se las tomó en el mes de noviembre en la región sierra, específicamente en la ciudad de Sangolquí. Este mes es parte de lo que podría se podría considerar invierno en el Ecuador, motivo por el que se dificulta tener largos periodos de alta radiación, es decir días calurosos y despejados.

Debido a este inconveniente se han registrado datos a diferentes horas del día en el cual el cielo se ha encontrado despejado y la radiación global ha sido alta, estos periodos en algunos días no han superado los 20 minutos debido al clima cambiante. A continuación se muestra un ejemplo de lista de datos tomados.

Tabla 18. Datos Tomados el día 12 Noviembre de 2014.

Hora	Temp. Ambiente	Temp. Concentra.	Temp. Foco	Irradiación Promedio
13:10	22,27	29,00	269,93	1050,50
13:11	22,00	29,00	275,63	988,50
13:12	22,07	29,20	275,00	1003,00
13:13	22,00	29,37	280,50	987,00
13:14	22,00	29,83	301,70	1033,20
13:15	22,00	28,20	292,63	1025,50
13:16	22,00	28,00	278,70	1025,30
13:17	22,00	28,00	278,93	1036,00
13:18	22,00	27,63	277,20	1112,70
13:19	22,00	27,67	293,20	1059,50
13:20	22,47	28,77	296,70	1066,00
13:21	23,00	29,70	299,17	1058,90
13:22	23,00	30,00	291,40	1031,40
13:23	23,00	30,57	302,00	1049,60
13:24	23,23	30,47	319,23	1035,50
13:25	23,00	30,17	323,13	1015,10
13:26	22,83	29,53	324,10	1056,90
13:27	22,93	28,93	307,43	1050,50
13:28	22,00	28,23	287,67	1026,80
13:29	22,00	28,00	259,70	1040,30
13:30	22,00	28,00	292,30	1031,80
13:31	22,00	28,73	315,10	1047,50
13:32	22,00	28,33	311,43	1033,70
13:33	21,73	28,00	292,43	1028,60
13:34	21,70	27,37	250,03	836,30
13:35	22,00	27,60	260,73	1112,20
13:36	22,17	28,37	316,47	1047,70
13:37	23,00	29,80	344,73	1054,60
13:38	22,13	28,87	314,40	1053,00
13:39	22,00	28,90	286,27	1051,10
13:40	22,00	28,93	304,23	1067,80
13:41	21,93	28,20	311,83	1107,20
13:42	22,00	28,07	314,10	1084,10
13:43	22,00	28,27	302,67	1058,30
13:44	22,00	27,17	256,87	411,10
13:45	21,37	26,33	154,70	222,90
13:46	21,00	26,00	96,12	200,29
13:47	21,00	26,00	84,00	207,00

Tabla 19. Datos Tomados el día 17 de Noviembre de 2014

Hora	Temp. Ambiente	Temp. Concentra.	Temp. Foco	Irradiación Promedio
11:23	23,00	29,00	188,60	920,20
11:24	23,00	29,00	177,33	912,40
11:25	23,00	29,40	195,97	915,50
11:26	22,10	28,00	236,00	926,60
11:27	21,07	27,13	260,67	917,10
11:28	21,00	27,00	301,83	919,40
11:29	21,20	27,63	340,83	863,80
11:30	22,00	28,10	362,30	945,60
11:31	22,00	29,00	327,63	914,00
11:32	22,00	28,67	322,07	875,70
11:33	21,00	27,40	298,37	851,50
11:34	21,00	26,97	278,50	883,90
11:35	21,47	27,33	289,20	951,00
11:36	22,00	28,00	305,00	925,20
11:37	22,53	28,00	282,30	931,60
11:38	23,00	28,77	286,23	931,90
11:39	23,83	29,67	296,50	918,40
11:40	24,00	30,33	317,77	994,20
11:41	23,63	30,40	315,20	966,30
11:42	23,00	29,73	266,80	999,70
11:43	23,00	30,00	240,13	961,90
11:44	23,00	30,00	246,57	926,60
11:45	23,00	30,00	263,10	937,50
11:46	23,97	30,67	272,13	937,30
11:47	24,00	30,77	254,10	977,20
11:48	24,00	30,87	253,63	936,70
11:49	24,00	31,00	247,87	974,20
11:50	24,73	31,00	237,27	971,60
11:51	24,47	30,83	223,03	953,40
11:52	23,17	29,90	214,07	967,20
11:53	23,40	29,37	235,73	984,30
11:54	23,00	29,00	229,87	1016,30
11:55	23,00	29,60	210,47	1020,80
11:56	23,30	30,00	197,87	1007,50
11:57	24,00	30,87	196,53	978,50
11:58	23,37	31,00	185,60	1051,00
11:59	23,00	31,37	181,37	1022,30
12:00	23,46	32,00	173,39	902,14
12:01	24,00	32,00	167,00	777,00

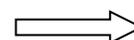
Tabla 20. Datos Tomados el día 19 de Noviembre de 2014

Hora	Temp. Ambiente	Temp. Concentra.	Temp. Foco	Irradiación Promedio
14:13	23,00	27,00	312,73	1039,50
14:14	23,00	26,77	346,77	1103,60
14:15	23,00	27,00	343,73	1087,00
14:16	23,00	27,00	346,33	1099,50
14:17	23,00	27,33	384,70	1102,00
14:18	23,00	28,00	365,30	807,80
14:19	23,83	28,13	292,47	559,70
14:20	23,00	27,20	178,80	295,70
14:21	23,10	26,37	103,00	201,50
14:22	23,00	25,40	62,76	181,68

Tabla 21. Datos Tomados el día 21 de Noviembre de 2014

Hora	Temp. Ambiente	Temp. Concentra.	Temp. Foco	Irradiación Promedio
12:24	24,00	32,47	160,13	1011,60
12:25	24,43	33,00	189,37	997,50
12:26	25,00	33,60	211,40	989,90
12:27	25,00	33,47	211,57	907,70
12:28	25,00	33,00	188,60	923,60
12:29	25,00	33,00	178,83	982,20
12:30	25,77	33,00	202,83	945,10
12:31	25,27	32,80	209,93	931,50
12:32	25,00	32,20	210,83	970,30
12:33	25,00	32,23	206,00	926,90
12:34	25,60	32,40	191,20	950,60
12:35	26,00	32,00	165,73	935,20
12:36	26,00	32,57	192,60	961,40
12:37	26,00	33,00	225,13	983,70
12:38	26,00	33,00	226,43	961,50
12:39	26,00	33,63	230,33	918,60
12:40	26,00	33,90	240,60	894,80
12:41	26,00	33,97	236,83	974,00
12:42	26,00	33,87	230,10	983,20
12:43	25,80	32,87	205,10	990,00
12:44	24,73	32,00	182,47	969,40
12:45	24,00	32,00	166,10	981,20

Continua



12:48	23,83	33,00	175,93	1015,10
12:49	24,00	33,00	174,83	984,30
12:50	24,23	33,00	172,60	868,30
12:51	24,97	32,93	169,10	815,70
12:52	24,00	32,80	163,03	908,60
12:53	24,40	32,20	159,10	363,90
12:54	25,00	31,93	112,90	441,90
12:55	25,00	32,00	95,17	624,20
12:56	25,00	31,03	104,43	683,80
12:57	25,00	31,00	102,30	968,20
12:58	25,00	31,57	113,03	1009,00
12:59	25,00	32,00	154,00	901,43
13:00	26,00	33,13	201,17	844,00
13:01	25,83	33,23	225,27	485,90
13:02	24,57	31,00	163,60	282,10
13:03	23,37	30,00	110,40	688,00
13:04	23,00	30,00	113,27	981,30
13:05	23,23	30,00	103,13	933,00
13:06	23,97	30,63	83,07	970,70
13:07	24,00	31,53	82,43	943,30
13:08	24,47	32,00	106,37	923,10
13:09	25,00	32,40	137,13	914,70
13:10	24,63	32,00	183,50	949,50
13:11	25,00	32,00	226,13	932,40
13:12	25,00	32,13	271,70	973,80
13:13	25,73	33,40	284,63	916,70
13:14	26,00	34,47	296,37	953,00
13:15	26,00	35,03	324,57	959,50
13:16	26,80	35,40	320,50	925,60
13:17	27,00	36,00	280,37	930,00
13:18	27,00	36,00	259,37	916,50
13:19	27,00	36,13	273,30	887,10
13:20	27,00	36,00	280,40	912,10
13:21	27,00	35,10	294,37	941,70
13:22	27,00	35,97	303,27	959,80
13:23	27,03	35,13	271,53	927,30
13:24	27,17	34,43	219,70	957,50
13:25	27,27	34,60	225,00	949,40
13:26	27,00	33,90	191,53	383,80
13:27	26,40	33,63	140,60	865,30
13:28	26,00	33,05	130,32	494,84

Tabla 22. Datos Tomados el día 24 de Noviembre de 2014

Hora	Temp. Ambiente	Temp. Concent.	Temp. Foco	Irradiación Promedio
10:26	22,83	28,70	106,67	929,30
10:27	23,00	29,00	195,03	919,40
10:28	22,67	28,40	243,47	889,50
10:29	22,00	28,00	264,97	911,70
10:30	22,00	28,00	252,43	916,30
10:31	22,00	28,00	253,10	907,30
10:32	21,40	28,00	282,50	907,20
10:33	21,00	28,00	270,60	968,20
10:34	21,00	27,37	274,93	904,10
10:35	21,00	27,23	268,27	888,30
10:36	21,00	27,97	243,50	941,80
10:37	21,13	28,50	290,53	924,40
10:38	22,00	29,00	326,87	956,50
10:39	22,00	29,00	307,27	892,60
10:40	22,00	29,00	279,63	694,20
10:41	22,00	29,00	268,03	791,70
10:42	22,57	29,00	282,67	847,60
10:43	23,00	29,30	286,93	872,10
10:44	23,00	30,13	292,73	914,10
10:45	23,00	31,00	289,20	964,60
10:46	23,33	31,00	312,87	972,50
10:47	24,00	31,00	302,50	947,70
10:48	24,00	31,27	288,23	975,30
10:49	24,00	31,50	255,83	993,70
10:50	23,57	31,37	202,87	929,50
10:51	23,00	31,67	204,47	932,30
10:52	23,00	31,63	282,23	912,70
10:53	23,00	31,97	297,80	901,90
10:54	23,00	31,30	271,83	874,20
10:55	23,00	31,00	219,70	807,80
10:56	23,00	30,57	195,37	559,70
10:57	23,00	30,00	155,37	772,90
10:58	23,00	29,57	112,87	356,30
10:59	23,00	29,00	73,43	288,70
11:00	23,00	29,00	59,33	338,00

5.1.2. Pruebas Seguimiento Manual

La toma de datos se ha empezado a partir de las 9AM hasta las 3PM durante un periodo de 15 días. Durante este tiempo se han registrado días con gran cantidad de datos mientras que en otros, debido a la presencia de lluvia e incluso neblina, fue imposible realizar una toma de datos válida.

A continuación se muestra la variación de temperatura en función de tiempo utilizando un método manual para el movimiento es decir la opción manual que permite mover cada motor de acuerdo al criterio del operario, para la localización del foco.

La figura 123 es la Gráfica de la temperatura en el foco graficada a partir de los datos de la tabla 19.

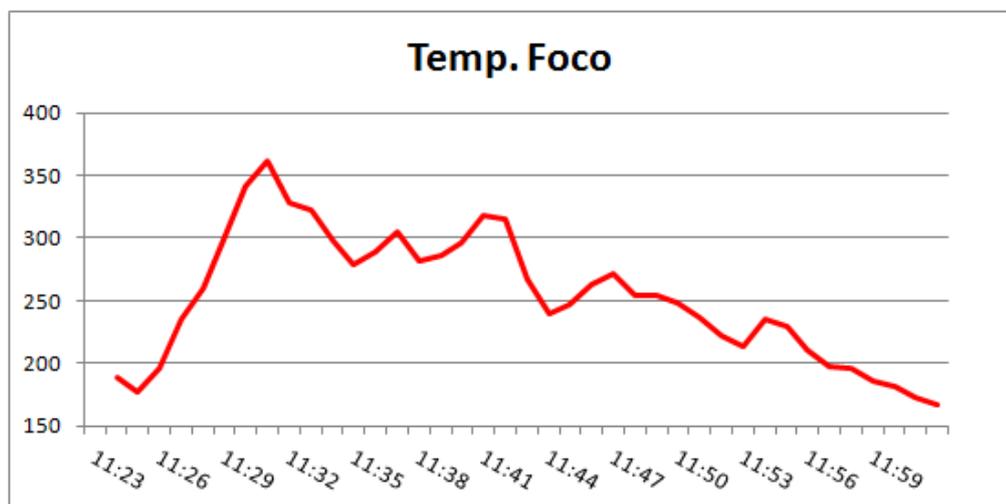


Fig. 123 Gráfica Temperatura en el Foco

En la figura 124 se observa en la gráfica la temperatura del foco cuyo eje de medida se encuentra a la izquierda. Así como también la irradiación promedio de ese día cuyo eje de medida se encuentra a la derecha.



Fig. 124 Gráfica Temperatura en el Foco Y Radiación Medida

Se puede apreciar como aunque la temperatura en el foco aumento rápidamente desde 177 grados hasta 362 en aproximadamente 7 minutos en los que la radiación se mantuvo en un valor de aproximadamente 915 W/m². Después del cual la temperatura volvió a descender. Esto se debe a que al estar en modo manual no se actualiza la posición del concentrador automáticamente y este deja de concentrar los radiación adecuadamente. Aproximadamente a las 11:34 el operador del equipo vuelve a ajustar la posición del sol con lo que consigue detener el proceso de enfriamiento y volver a aumentar la temperatura en el foco.

Así se realizan algunos ciclos con un tiempo de corrección de aproximadamente 10 minutos, los cuales se ven reflejados en un cambio del gradiente de temperatura, pero que no consiguieron recuperar en su totalidad el calor que se concentro al iniciar el experimento. La razón de emplear un tiempo de 10 minutos el cual es mayor al calculado como tiempo

óptimo es que resulta tedioso y cansado para el operador tener que encontrar la posición del sol cada 4 minutos.

En la gráfica125 se muestra la variación de la temperatura ambiente de acuerdo a la radiación, lo cual muestra que en ciertos casos el clima también afecta al sistema, ya que en ciertos momentos se tiene ráfagas de viento fuertes que enfrían y afectan la curva de temperatura.

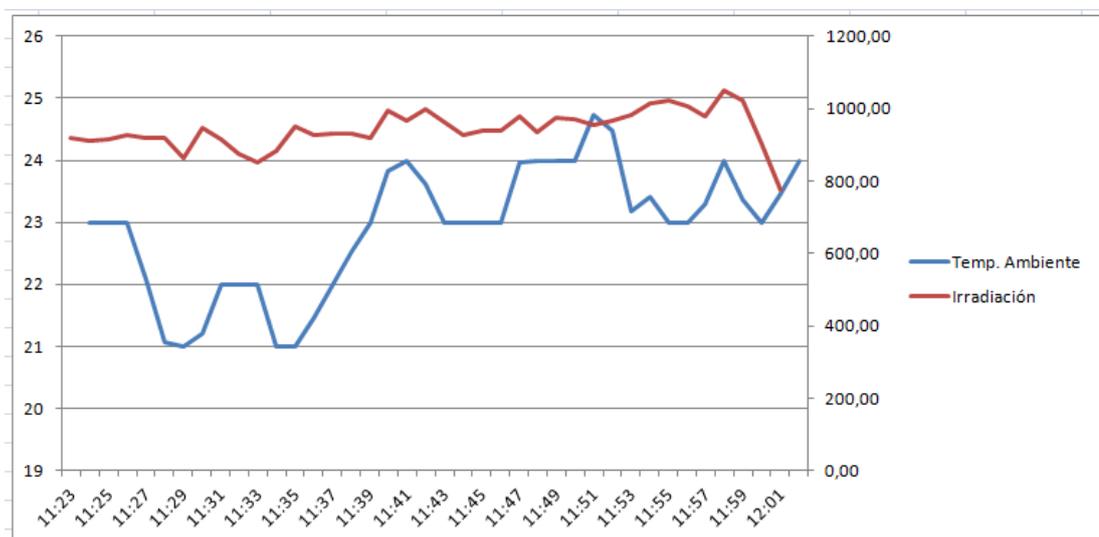


Fig. 125 Gráfica Radiación Y Temperatura Ambiente

Como se pudo observar en las gráficas con este método de seguimiento manual se logró llegar hasta temperaturas de 362 grados, sin embargo no se pudo mantener esta temperatura y se perdió con facilidad, lo que indica que la eficiencia no es tan alta debido a que la alineación del concentrador no se realizó al tiempo debido. Aún así con un operador que sea capaz de encontrar la posición del sol se puede conseguir que el sistema vuelva a entrar en fase de calentamiento como se vio en la figura 124.

5.1.3. Pruebas Seguimiento Automático

En el modo automático se utilizó un tiempo de actualización de 4 minutos, que es el que se estableció para el modo automático y que se encuentra muy por debajo de los 10 minutos empleados de forma manual.

La figura a continuación se construyó con los datos de la tabla 21 y muestran la variación de temperatura del foco.

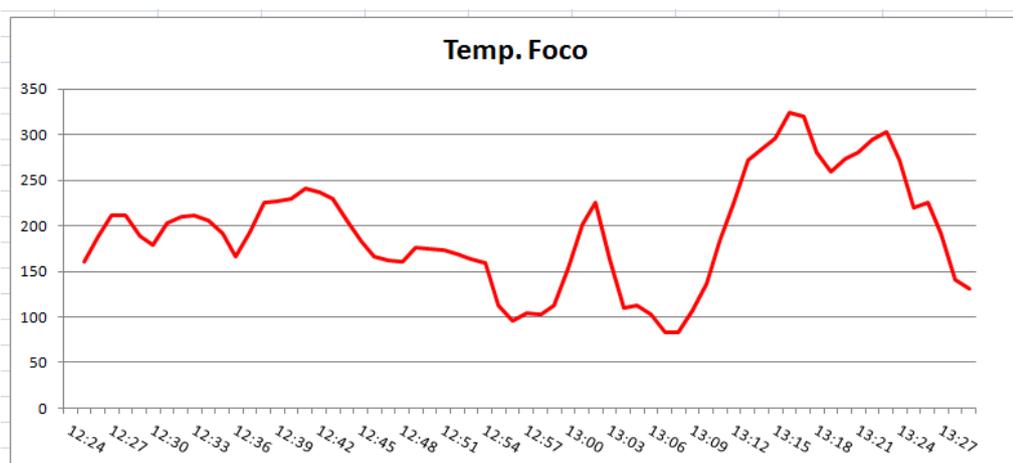


Fig. 126 Gráfica Temperatura en el Foco.

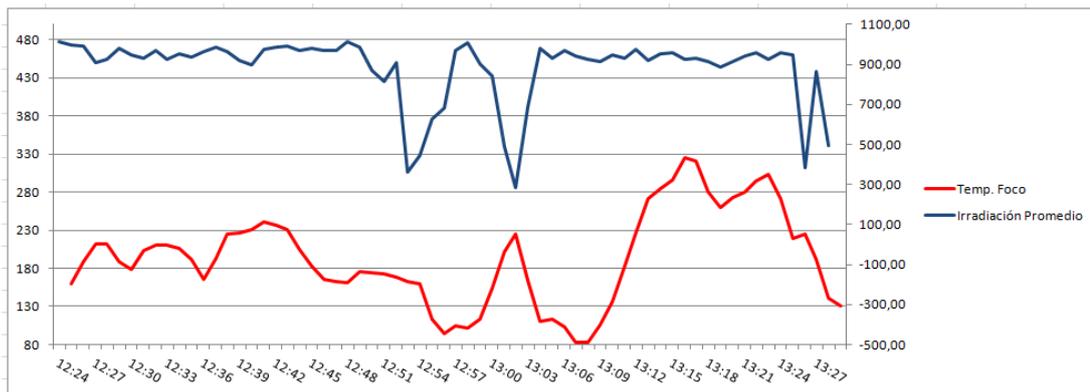


Fig. 127. Gráfica Radiación Medida Y Temperatura en el Foco.

En la gráfica 126 se puede observar que existen los mismos picos en los que el equipo pasa de calentamiento a enfriamiento y viceversa, sin embargo estos se realizan en menor tiempo sin ocasionar molestias para el operador del equipo. Adicionalmente en la gráfica 127 al graficar también los valores de radiación podemos ver como esta afecta directamente a la temperatura, y que por más exacto que sea el tiempo de actualización del modo automático, este no es capaz de corregir los efectos del microclima en la radiación global, y en la temperatura en el foco.

Los datos que se obtuvieron se pueden visualizar en una pantalla lcd en la estructura del concentrador, adicionalmente de las hojas de cálculo que se provee el sistema. Los periodos calculados para la toma de datos están determinados en aproximadamente 3 a 5 minutos debido a que ese es el tiempo de actualización calculado.



Fig. 128 Visualización Datos

5.1.4. Análisis de Resultados

En las gráficas mostradas de las hojas de cálculo que proporciona el programa de toma de datos se pudo observar que el posicionamiento se lo puede realizar de manera rápida en aproximadamente un minuto sin la necesidad de personas externas que muevan al concentrador como se lo hacía anteriormente y con una mayor precisión en la ubicación, cabe recalcar que en un concentrador si no se encuentra perpendicularmente al sol no tendrá ningún efecto pues el foco necesita estar perpendicular al sol para concentrar y generar esas temperaturas y esa cantidad de energía.

En la mayoría de toma de datos se puede registrar que la mayor cantidad de temperatura y radiación se encuentran entre las 12:45 y 14:00 PM donde se marcaron una irradiancia global de 1020 w/m² obteniendo una temperatura de alrededor de los 350 grados.

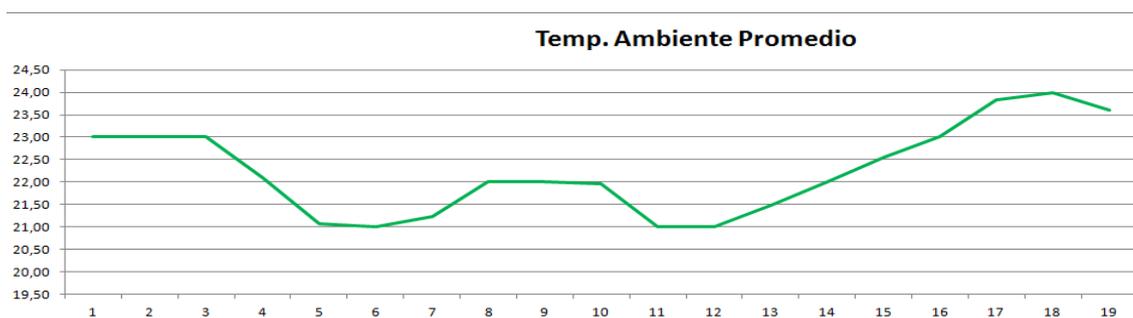


Fig. 129 Gráfica Temperatura Ambiente Promedio

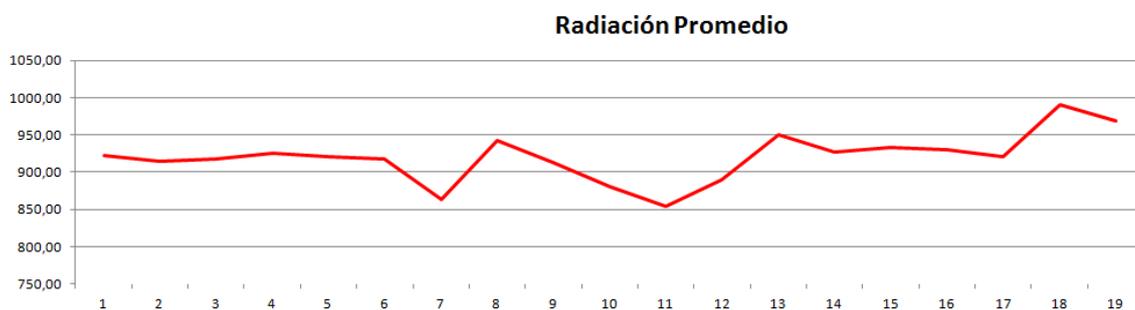


Fig. 130 Gráfica Radiación Medida Promedio

En la figura 128 se muestra como aumenta la temperatura ambiente conforme lo hace la radiación y también su afectación al disminuir esta, pero además se ven los saltos en ciertas partes que indican momentos en los cuales existieron ventiscas fuertes y frías además de momento de pequeños chubascos que pasaron rápidamente pero quedaron registrados por el sensor de temperatura.

Finalmente se observa que el sensor que se ubica en el acrílico, se encuentra a una mayor temperatura que la ambiente en todo momento, esto se debe básicamente porque se encuentra en contacto con el acrílico en la parte inferior en la cual es muy difícil ser afectado por los vientos o cambios externos de manera muy rápida.

Adicionalmente a eso siempre está en contacto con el acrílico que es el material que concentra el calor. La temperatura en el concentrador está en un promedio de 29 grados teniendo un máximo de 32 grados en un día que se obtuvo grandes cantidades de radiación.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

- La máxima temperatura alcanzada en el tiempo de pruebas realizado fue de 384,7 grados centígrados, los cuales fueron alcanzados con una radiación promedio de 1086 W/m² y una distancia al foco de 3.35 m.
- Esta temperatura se consiguió partiendo de un ensayo de calentamiento previo en la cual se consiguió llegar a los 312 grados centígrados, después de los cuales durante aproximadamente 4 minutos se mantuvo una radiación directa alta la cual permitió alcanzar dicho valor.
- El equipo de fotohidroconversión resulta muy sensible a los valores de radiación global, específicamente de la radiación directa, por lo que se ve muy afectado por los microclimas existentes, y todo tipo de nubosidades.
- El valor de la temperatura ambiente resulta fundamental para tener una mejor comprensión de la radiación directa que se está recibiendo ya que se dan casos de una radiación global alta pero con un alto componente de radiación difusa lo que genera una sensación térmica baja en el ambiente y una temperatura focal baja.

- El mecanismo diseñado para el seguimiento permite ,mediante un control on - off, mejorar el posicionamiento solar con una precisión de 1 grado y así aumentar la eficiencia en la concentración de radiación en punto focal.
- El mecanismo permite realizar los movimientos en los dos ejes acimutal y cenital de forma independiente y controlada con una variación aproximada de 4 grados de acuerdo a las órdenes generadas por el usuario para su posicionamiento o para cualquier uso que se le pueda dar.
- La implementación de un seguimiento solar automático resulta muy conveniente para precautelar la salud de las personas que trabajen con el equipo, ya que elimina riesgos de altura, permite una mayor comodidad de trabajo, y reduce la exposición de la persona a la radiación directa necesaria para el ensayo, pero perjudicial para la salud humana.
- El equipo es flexible por lo que permite cambiar el concentrador por otro diferente o por cualquier tipo de sistema de colección solar en el momento que lo desee siempre y cuando este no supere los 60 Kg de peso completo, debido a que el aumento de este produce un aumento de torque necesario para el movimiento, lo cual ocasionaría un sobrecalentamiento y forzamiento de los motores.
- El diseño electrónico permite conocer las variables de proceso de tres maneras diferentes. La primera en una pantalla LCD en la estructura. La segunda en la aplicación Android que muestra una actualización de los datos haciendo un “clic”. Finalmente mediante un ejecutable en

Visual Studio que permite exportar los datos en una hoja de cálculo en tiempo real.

- La utilización de hoja de cálculos electrónico permite una mayor comprensión del ensayo ya que muestra datos en tiempo real, los filtra y permite diferenciar en errores de medición, para finalmente almacenarlos para su uso y análisis posterior, los datos son actualizados cada segundo es decir 1dato/s, lo que nos permite después filtrar los mismos y manejar de mejor manera los datos.

6.2 RECOMENDACIONES

Para realizar un mejoramiento en el equipo se debe considerar las especificaciones técnicas, especialmente de carga que puede soportar, piezas que lo componen y además tomar en cuenta la longitud del foco para saber la ubicación del absorbedor.

- En el caso de concentradores que contengan un líquido como medio óptico tener en cuenta que en grandes cantidades al no estar lleno el concentrador y moverse genera un golpe de ariete que si no se tiene cuidado puede averiar los engranes auto bloqueantes.
- Se debe tener cuidado al estar expuesto a altos niveles de radiación solar, ya que son dañinos para la salud, tanto en problemas pequeños como producir insolación y malestar del operador, hasta problemas mucho mayores en largas exposiciones como aumento del riesgo de cáncer a la piel entre otros.
- Promover los proyectos de investigación en el campo de energía renovables debido a que existen varios campos y formas en los cuales el

área de energía podría mejorar sus resultados automatizando más los procesos.

- El sistema utiliza un control on – off para el seguimiento pero a pesar que es funcional puede ser mejorado utilizando otro tipo como pid o pid-fuzzy, que mejoraría mucho más el rendimiento.
- Se debe tomar en cuenta que la caja de engranes necesitara cada cierto tiempo un mantenimiento preventivo en lo que respecta a proporcionar algo de grasa y una limpieza general.
- Todos los elementos debido a encontrarse a la intemperie, están expuestos a un deterioro acelerado, el cual debe ser evitado mediante la implementación de cajas protectoras que ayuden a evitar que estos componentes dejen de funcionar adecuadamente. Por tal motivo se debe comprobar periódicamente el estado de estas cajas protectoras para que continuen cumpliendo su función de protección de elementos sensibles.

Bibliografía

- Alvarenga, B., & Ribeiro, A. (1998). *Física General*. México: Oxford University Press.
- Arduino. (10 de 10 de 2014). *Arduino* cc. Obtenido de <http://arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega2560>
- Astrociencia. (18 de 09 de 2011). Obtenido de Lentes y tipos de lentes: <http://www.astrociencia.com/2011/09/18/que-es-una-lente-y-tipos-de-lentes/>
- Boundless. (04 de 07 de 2014). *BOUNDLESS*. Obtenido de <https://www.boundless.com/physics/geometric-optics/lenses/the-lensmaker-s-equation/>
- ClearEnergySolar. (12 de 08 de 2014). <http://www.cleanergysolar.com>. Obtenido de <http://www.cleanergysolar.com>: <http://www.cleanergysolar.com/2011/05/14/tutorial-coordenadas-de-posicion-de-un-punto-terrestre/>
- CONELEC. (12 de Marzo de 2008). *Consejo Nacional de Electricidad*. Obtenido de <http://www.conelec.gob.ec/>
- Creus. (27 de 10 de 2014). *Wikipedia*. Obtenido de <http://es.wikipedia.org/wiki/Termopar>
- DiarioHoy. (12 de Marzo de 2011). *Energías Renovables en Ecuador*. Obtenido de <http://www.hoy.com.ec/noticias-ecuador/energias-alternativas-463624.html>
- DSD. (10 de 11 de 2014). *Dispositivos semiconductores discretos*. Obtenido de http://www.dsd.com.br/Arquivos/ldr_01_grande.gif
- Duffie, J. (1974). *Solar Energy Thermal Processes*. John Wiley & Sons.
- Electronics, F. (24 de 11 de 2014). *Puente H*. Obtenido de <http://www.ucontrol.com.ar/>
- electronics, W. (20 de 11 de 2014). *SENSORES FOTOELECTRICOS*. Obtenido de http://es.wikipedia.org/wiki/Sensor_fotoel%C3%A9ctrico

EnergizAr. (s.f.). *Seguidor Solar*.

G.Zabalza. (24 de 11 de 2010). *Energia con Disco Parabolico*. Obtenido de http://www.fing.edu.uy/if/solar/proyectos/PROYECTO_energ%C3%ADa_%20solar_Zabalza_Rev%201.pdf

Garavito, J. (18 de Noviembre de 2013). *Tratamientos Termicos*. Obtenido de http://www.escuelaing.edu.co/uploads/laboratorios/1537_tratamientostermicosr2.pdf

Gonzalez, J. (2009). *Energias Renovables*. Barcelona: Reverte.

Guasumba, J, Suntaxi, J. (2008). Hidroconversión de la radiación solar para aplicaciones térmicas de alta temperatura sin emision de sustancias contaminantes. 2-9.

Henry, P. (s.f.). *Física General*. México, D.F. : Editorial Hispanoamericana.

INCROPERA, F. P. (1999). *Fundamentos de Transferencia de calor*. México: Prentice Hall.

INSTRUMENTS, N. (03 de 10 de 2014). *Comunicacion Serial : Conceptos*. Obtenido de <http://digital.ni.com/public.nsf/allkb/039001258CEF8FB686256E0F005888D1>

J.Guasumba, S. S. (2011). *Radiacion y Geometria solar*. Sangolqui, Ecuador.

Jutglar, L. (2004). *books.google.com.ec*. Obtenido de <http://books.google.com.ec/>: <http://books.google.com.ec/books?id=l0qPPTGMRUYC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>

Lorenzo, E. (2006). *Electricidad Solar Fotovoltaica*. Sevilla.

M.J. Denegri, C. R. (2012). *EVALUACIÓN DE DIFERENTES MODELOS UTILIZADOS PARA LA ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN FOTOSINTÉTICAMENTE ACTIVA EN PLANOS INCLINADOS*. Buenos Aires: GERSolar.

- Makerbot. (21 de 08 de 2014). *Thiniverse*. Obtenido de <http://www.thingiverse.com/thing:1334>
- MEER. (13 de Noviembre de 2013). *Ministerio de Electricidad y Energia Renovable*. Obtenido de <http://www.energia.gob.ec/subsecretaria-de-energia-renovable-y-eficiencia-energetica/>
- Meteoarchena. (10 de 11 de 2014). *Dispositivos de medicion solar*. Obtenido de Fuente: <http://www.meteoarchena.es/estacion.html>
- Microchip Company. (s.f.). *SPI - PICmicro Serial Peripheral Interface*.
- MIT. (08 de 06 de 2014). *App inventor 2*. Obtenido de <http://appinventor.mit.edu/>
- Nestor, A. (12 de Febrero de 2014). *ANTENAS CON REFLECTORES PARABOLICOS*. Obtenido de arias@tucbbs.com.ar
- Page. (1964).
- Post, C. (20 de 04 de 2014). *Construccion de una carta solar*. Obtenido de <http://doyoucity.com/proyectos/entrada/2118>
- POST, E. (28 de 08 de 2014). *Teoria y construcción de fuente lineales*. Obtenido de <http://diystart.blogspot.com/2012/12/teoria-y-construccion-de-fuentes-de.html>
- Schmidtke, R. (2011). <http://enciclopedia.us.es/>. Obtenido de <http://enciclopedia.us.es/>: <http://enciclopedia.us.es/index.php/Paraboloide>
- SENSORES, E.-B. (20 de 11 de 2014). *SENSORES*. Obtenido de [http://i.ebayimg.com/00/s/NjAwWDYwMA==/z/prcAAOSw-jhUKQRm/\\$_35.JPG](http://i.ebayimg.com/00/s/NjAwWDYwMA==/z/prcAAOSw-jhUKQRm/$_35.JPG)
- Steward, J. (2008). *Cálculo de varias variables*. Cengage Learning.
- TUTORIALES, A. (10 de 11 de 2014). *Examples*. Obtenido de <http://arduino.cc/en/Tutorial/HomePage>
- WANADOO. (10 de 10 de 2014). *ELECTRONICA*. Obtenido de <http://perso.wanadoo.es/pictob/comserie.htm>

Wikipedia. (24 de 11 de 2014). *La parábola*. Obtenido de Parábola:
http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/3/34/Construccion_de_la_parabola.svg/580px-Construccion_de_la_parabola.svg.png

Wikipedia. (s.f.). *Microsoft Visual Studio*.

Zedano, R. H. (2009). *Dispositivos de Control*. Peru.

(MIT, 2014)