



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA**

MAESTRÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES

I PROMOCIÓN

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
MAGÍSTER EN ENERGÍAS RENOVABLES**

**TEMA: DESARROLLO EXPERIMENTAL DE UN SISTEMA DE
SEGUIMIENTO SOLAR PARA LA OBTENCIÓN DE LA MÁXIMA
RADIACIÓN EN CONCENTRADORES CILÍNDRICO PARABÓLICOS**

AUTOR: FABARA SANCHEZ JORGE VINICIO

DIRECTORA: ING. TOBAR JOHANNA MSC.

SANGOLQUÍ

2016



CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR

La suscrita Ing. Johanna Tobar, con número de cédula N° 1717171241 en calidad de Directora de Tesis de la Maestría de Energías Renovables

CERTIFICA

Que luego de haber revisado a detalle el presente proyecto de grado que lleva como título, **“DESARROLLO EXPERIMENTAL DE UN SISTEMA DE SEGUIMIENTO SOLAR PARA LA OBTENCIÓN DE LA MÁXIMA RADIACIÓN EN CONCENTRADORES CILÍNDRICO PARABÓLICOS”** realizado por el maestrante **JORGE VINICIO FABARA SÁNCHEZ**, de nacionalidad ecuatoriana, con cédula de identidad N°1706895073, como requisito para la obtención del título de Magister en Energías Renovables, I Promoción de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, certifico que cumple con los requerimientos científicos, tecnológicos y académicos, razón por la cual autorizo su presentación y defensa.

Sangolquí, 14 de Diciembre del 2016

ING. JOHANNA TOBAR MSC
DIRECTORA



**VICERECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA
DE TECNOLOGÍA**

**MAESTRÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES
PRIMERA PROMOCIÓN**

Sangolquí, 15 de Diciembre del 2016

AUTORIZACIÓN

Yo JORGE VINICIO FABARA SANCHEZ, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución el presente trabajo de titulación “**DESARROLLO EXPERIMENTAL DE UN SISTEMA DE SEGUIMIENTO SOLAR PARA LA OBTENCIÓN DE LA MÁXIMA RADIACIÓN EN CONCENTRADORES CILÍNDRICO PARABÓLICOS**” cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad y autoría

JORGE VINICIO FABARA SANCHEZ

CI: 1706895073

DEDICATORIA

Dedico este proyecto de tesis a mi Madre, Esposa e Hijos, su comprensión y apoyo ha permitido que culmine este trabajo.

Jorge Vinicio Fabara Sánchez

Septiembre 2016

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi Directora de este Proyecto, al Ing. José Guasumba, a mis profesores, mis compañeros y en especial a Joseph, Luis, Dany y Patricio.

Jorge Vinicio Fabara Sánchez

Septiembre 2016

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO.....	i
AUTORIA DE RESPONSABILIDAD	ii
AUTORIZACIÓN.....	iii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	vi
NOMENCLATURA.....	x
TABLAS.....	x
FIGURAS.....	xii
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT	xvii

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES	1
1.1 ANTECEDENTES.....	1
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	2
1.3 OBJETIVOS.....	2
1.3.1 GENERAL.....	2
1.3.2 ESPECÍFICOS.....	2
1.4 ALCANCE DEL PROYECTO	3
1.5 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DEL PROYECTO	3

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE DE SISTEMAS DE CONCENTRACIÓN	4
2.1 RADIACIÓN SOLAR.....	5
2.1.1 EL SOL	5
2.1.2 RADIACIÓN SOLAR EXTRATERRESTRE	6
2.1.3 RADIACIÓN SOLAR TERRESTRE	6
2.1.4 MEDICIÓN DE LA ENERGÍA SOLAR INCIDENTE SOBRE EL SUELO	8
2.1.5 POSICIÓN DEL SOL	10

	vi
2.1.6	ÁNGULO DE DIRECCIÓN DE LA RADIACIÓN..... 13
2.1.7	RADIACIÓN SOLAR SOBRE SUPERFICIES INCLINADAS 14
2.2	SISTEMAS DE CONCENTRACIÓN 15
2.2.1	TÉCNICAS DE CONCENTRACIÓN 15
2.2.1.1	EQUIPOS FOTO TÉRMICOS DE BAJA TEMPERATURA 15
2.2.2	GEOMETRÍA DE CONCENTRADORES 18
2.2.3	ESPEJOS PARABOLICOS Y LENTES.....20
2.2.4	HELIOSTATOS Y TORRES DE POTENCIA SOLAR21
2.2.5	CONCENTRADORES CILINDRO PARABÓLICOS CCP23
2.3	SISTEMAS DE CONTROL PARA LOS SISTEMAS DE CONCENTRACION CILIDRO PARABOLICOS24
2.3.1	SENSORES24
2.3.1.1	SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO HORARIO DEL SOL24
2.3.1.2	SISTEMAS DE SENSORES ELECTRÓNICOS.....25
2.3.2	SISTEMAS DE CONTROL DE SEGUIMIENTO SOLAR25
2.3.3	ACTUADORES PARA SISTEMAS DE SEGUIMIENTO SOLAR30
2.3.4	SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DEL SEGUIDOR32
2.3.4.1	SUBSISTEMA SENSOR.....32
2.3.4.2	SUBSISTEMA DE CONTROL33
2.3.4.3	EL SUBSISTEMA DE ACTUACIÓN.....33

CAPÍTULO 3

	DISEÑO DEL SISTEMA DE SEGUIMIENTO SOLAR.....34
3.1	DETERMINACIÓN DE LA POSICIÓN SOLAR LOCAL34
3.1.1	COORDENADAS HORARIAS34
3.1.2	COORDENADAS ANGULARES.....38
3.1.3	DETERMINACIÓN DE LA POSICIÓN SOLAR LOCAL EN EL ÁREA DE ESTUDIO.40
3.2	INCIDENCIA DE LA POSICIÓN DEL SOL SOBRE UN SISTEMA CILINDRO PARABÓLICO42
3.3	DESARROLLO DEL PROTOTIPO44
3.3.1	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA CILINDRO PARABÓLICO CONSTRUIDO44

3.3.2	ANÁLISIS GEOMÉTRICO DEL CONCENTRADOR CILINDRO- PARABÓLICO.....	44
3.3.2.1	ÓPTICA ESFÉRICA.....	46
3.3.2.2	ÓPTICA PARABÓLICA.....	48
3.3.2.3	ANÁLISIS Y DESARROLLO DE RELACIONES MATEMÁTICA..	50
3.3.2.4	ANÁLISIS DE LA POSICIÓN DEL CONJUNTO DEL CCP.....	52
3.3.2.5	ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA TOLERANCIA DE TIEMPO ENTRE EL SEGUIDOR SOLAR Y EL MOVIMIENTO DEL SOL PARA LA MÁXIMA INCIDENCIA PERMISIBLE DE LOS RAYOS SOBRE EL SISTEMA ABSORVEDOR.....	53
3.3.2.6	ANÁLISIS DEL PUNTO DE ARRANQUE Y PARADA DEL SISTEMA DE SEGUIMIENTO SOLAR	56
3.3.3	DISEÑO MECÁNICO DEL SISTEMA DE SEGUIMIENTO	57
3.3.3.1	CÁLCULO DEL SISTEMA DE ACOPLAMIENTO MECÁNICO MOTOREDUCTOR – EJE SISTEMAS CILINDRO- PARABÓLICO.....	57
3.3.3.2	DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DEL ESPEJO CILINDRO-PARABÓLICO	63
3.3.4	DISEÑO ELÉCTRICO DEL SISTEMA DE SEGUIMIENTO	69
3.3.4.1	DISEÑO DEL SISTEMA DE FUERZA	69
3.3.5	DISEÑO ELECTRÓNICO DEL SISTEMA DE CONTROL	72
3.3.5.1	ANÁLISIS TEÓRICO DEL SISTEMA DE CONTROL.....	72
3.3.5.2	DESCRIPCIÓN DE LOS ELEMENTOS A CONTROLAR	76
3.3.5.3	PROCESAMIENTO DE CONTROL BASADO EN PLC	80

CAPÍTULO 4

	ENSAYOS DEL SEGUIDOR SOLAR.....	98
4.1	PROTOCOLO DE PRUEBAS DE LA INSTALACIÓN DEL SISTEMA	98
4.1.1	ESTADO DE LA PARTE MECÁNICA DEL SISTEMA.....	98
4.1.2	ESTADO DE LA PARTE ELÉCTRICA DEL SISTEMA	99
4.2	ANÁLISIS FUNCIONAMIENTO ELÉCTRICO Y MECÁNICO.	99

4.2.1	ESTADO DE ARRANQUE DEL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA	99
4.2.2	ESTADO NORMAL DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA....	100
4.2.3	ESTADO DE FALLA DEL SISTEMA.....	100
4.3	TRANSFERENCIA DE DATOS, PROCESAMIENTO Y CONTROL DE PARÁMETROS	101
4.4	VISUALIZACIÓN DE RESULTADOS A TRAVÉS DEL INTERFACE HOMBRE MÁQUINA	102

CAPÍTULO 5

	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	104
5.1	TABULACIÓN DE DATOS OBTENIDOS.....	104
5.2	ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DATOS DEL SEGUIDOR SOLAR..	115
5.3	PROYECCIONES FUTURAS APLICABLES A MODELOS PRODUCTIVOS.....	119
5.4	EVALUACIÓN TÉCNICA DEL SISTEMA CILINDRO PARABÓLICO.....	122
5.5	EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL SISTEMA CILINDRO PARABÓLICO	125
5.6	EVALUACIÓN AMBIENTAL DEL SISTEMA CILINDRO PARABÓLICO.....	127
5.6.1	ANÁLISIS DE LÍNEA BASE	130
5.6.2	ANÁLISIS DE ASPECTOS AMBIENTALES SIGNIFICATIVOS	130

CAPÍTULO 6

	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	132
6.1	CONCLUSIONES	132
6.2	RECOMENDACIONES	135

	BILBIOGRAFÍA.....	137
--	-------------------	-----

ANEXO	DATOS METEREOLÓGICOS ZONA CENTRAL PROVINCIA DE PICHINCHA.....	141
--------------	--	------------

NOMENCLATURA

AIE	Asociación Internacional de Energía.....	4
IAU	Unión astronómica Internacional	10
SEIA	Asociación de la Industria de Energía Solar	19
CCP	Concentrador cilindro parabólico.....	24
LQG	Linear Quadratic Gaussian.....	27
D.C	Corriente continua	29
PLC	Controlador lógico programable.....	32
TSV	Tiempo solar verdadero	34
°	Declinación.....	36
Ø°	Latitud.....	36
h°	Ángulo Horario.....	37
TSM	Tiempo solar medio	37
ET	Ecuación de tiempo(min).....	38
TC	Tiempo civil	38
e	Adelanto respecto de la hora civil	39
m	Longitud del meridiano medio del huso horario adoptado	39
	Longitud del meridiano sobre el punto estudiado.....	40
	Azimut solar	40
β	Altura solar	40
ψ	Ángulo Cenital.....	41
Td	Timepo del día.....	41
GMT	Hora del meridiano de Greenwich.....	42
HO	Hora oficial del país	42
FP	Foco Paraxial	50
T	Torque (N.m)	52
V	Velociad	59
VAC	Voltaje corriente alterna.....	59

TABLAS

Tabla 1	Disponibilidad Promedio anual de energía solar por regiones	8
Tabla 2	Valores medios de la declinación	12
Tabla 3	V Características Generales Centrales Eléctricas Termosolares ...	19
Tabla 4	Valores medios de la ecuación del tiempo (en minutos).....	36
Tabla 5	Coeficiente de corrección de la polea.....	59
Tabla 6	Datos para la sección de la banda	60
Tabla 7	Dimensiones sección bandas	60
Tabla 8	Diámetro primitivo de las poleas.....	61
Tabla 9	Velocidades máximas según material	62
Tabla 10	Longitud primitiva nominal	63
Tabla 11	Características del Motoreductor	65
Tabla 12	Tablero seguidor parabólico	69
Tabla 13	Datos de entrada y salida en lazo abierto.....	73
Tabla 14	Variables utilizadas en el Intouch y referenciadas a las variables del PLC	95
Tabla 15	Valores del TSV y el tiempo del sistema para el 19 de Septiembre del 2016.....	105
Tabla 16	Valores del TSV y el tiempo del sistema para el 20 de Septiembre del 2016.....	108
Tabla 17	Valores del TSV y el tiempo del sistema para el 21 de Septiembre del 2016.....	110
Tabla 18	Valores del TSV y el tiempo del sistema para el 22 de Septiembre del 2016.....	113
Tabla 19	Análisis estadístico 19/09/2016	115
Tabla 20	Análisis estadístico 20/09/2016	116
Tabla 21	Análisis estadístico 21/09/2016	116
Tabla 22	Análisis estadístico 22/09/2016	117
Tabla 23	Análisis estadístico total.....	118
Tabla 24	Horas de Sol diarias en diferentes regiones del Ecuador	120
Tabla 25	Costos Directos de Materiales.....	125
Tabla 26	Costos Directos de Mano de Obra	126
Tabla 27	Costos Directos Indirectos y de Administración.....	127

Tabla 28	Costos totales del Proyecto	127
Tabla 29	Análisis de Impactos Ambientales Significativos y Acciones propuestas	128
Tabla 30	Matriz de Leopold	131

FIGURAS

Figura 1	Distribución del Espectro de la Radiación solar	7
Figura 2	Piranómetro	9
Figura 3	Pirheliómetro	10
Figura 4	Variación del ángulo de declinación a lo largo del año	11
Figura 5	Incidencia de los rayos solares en el solsticio de invierno 23 de Diciembre.....	14
Figura 6	Trayectoria aparente del sol respecto de un punto P en la superficie terrestre	15
Figura 7	Principio de Funcionamiento de un colector térmico de tubos ...	18
Figura 8	Colector solar de disco Parabólico con Motor Stirling	21
Figura 9	Torre para concentración solar	22
Figura 10	Diagrama esquemático de un CCP	24
Figura 11	Diagrama Esquemático de un mecanismo sensor	25
Figura 12	Descripción del funcionamiento de un seguidor solar de un solo eje	29
Figura 13	Sistema de Seguimiento Solar Cortesía Panasonic.....	30
Figura 14	Sistema de Seguimiento Solar Cortesía Evolve Solar	31
Figura 15	Sistema de Seguimiento Solar Cortesía Panasonic.....	31
Figura 16	Descripción del funcionamiento de un seguidor solar de un solo eje.	33
Figura 17	Latitud dada por el ángulo θ^0 y el ángulo horario h^0 dado para un punto P situado sobre la superficie de la Tierra.....	34
Figura 18	Posición del sol respecto de una superficie horizontal.....	38
Figura 19	Mapa del Ecuador	41
Figura 20	Plano ESPE en Google Maps con las coordenadas de ubicación Sistema de Concentración Cilíndrico Parabólico	41
Figura 21	Declinación del sol entre invierno y verano para la ESPE	43
Figura 22	Ubicación del sol a las 12h00 del Tiempo solar verdadero TSV.....	43
Figura 23	Cuerpos cilíndricos del sistema..	45

Figura 24	Vista lateral con dimensiones	45
Figura 25	Vista frontal de 2 cuerpos con dimensiones.....	46
Figura 26	Lugar Geométrico correspondiente a una circunferencia.....	47
Figura 27	Características de la incidencia de los rayos solares sobre óptica esférica.....	47
Figura 28	Parábola y sus elementos.....	48
Figura 29	Perfil teórico con medidas referenciales	49
Figura 30	Mediciones tomadas del Reflector Cilíndro Parabólico construido	51
Figura 31	Ubicación de Sensores sobre el Reflector Cilindro Parabólico.....	53
Figura 32	Rayos incidentes y reflejados sobre el tubo absorbedor para un ángulo de corona de 30° sobre el espejo real	54
Figura 33	Irradiación Solar Diaria Estación Yaruqui OCP	57
Figura 34	Elección de la sección de la correa.....	59
Figura 35	Características de la sección de la correa.	60
Figura 36	Equipo Motoreductor acoplado al sistema.	66
Figura 37	Diagrama de partes mecánicas	68
Figura 38	Diagrama de fuerza del Motor.....	70
Figura 39	Diagrama del Sistema eléctrico	72
Figura 40	Comportamiento Sistema ante Entrada Escalón	74
Figura 41	Comportamiento Sistema ante Entrada Rampa.....	75
Figura 42	Diagrama de Nyquist.....	76
Figura 43	Vista lateral del Seguidor con la ubicación de los sensores instalados.....	78
Figura 44	Diagrama de Control del PLC	81
Figura 45	Software para programación del PLC Micrologic 1400	82
Figura 46	Imagen de Rutina Principal Software de programación del PLC.....	82
Figura 47	Diagrama de flujo – rutina principal.....	85
Figura 48	Diagrama de flujo – subrutina TIME parte A.....	86
Figura 49	Diagrama de flujo – subrutina TIME parte B	87
Figura 50	Diagrama de flujo – subrutina PROG parte A	88

Figura 51	Diagrama de flujo – subrutina PROG parte B	89
Figura 52	Diagrama de flujo – subrutina HOME.....	90
Figura 53	Diagrama de flujo – subrutina FALLAS	91
Figura 54	Diagrama de flujo – subrutinas IOS Y HSC	92
Figura 55	Pantalla de Windowmaker aplicada al concentrador Cilíndrico Parabólico	93
Figura 56	Pantalla de Windowviewer aplicada al concentrador Cilíndrico Parabólico.....	94
Figura 57	Pantalla de System Management Console como enlace entre las variables del Intouch y las del PLC	95
Figura 58	Interfaz gráfica del movimiento del Colector Cilíndrico Parabólico.....	97
Figura 59	Pantalla que muestra la base de datos SQL Server donde se ha almacenado los valores del TSV y el Tiempo del sistema	104
Figura 60	Gráfico del seguimiento del Tiempo TSV y Tiempo del sistema para el 19 de Septiembre del 2016.....	106
Figura 61	Grafico del error producido entre el TSV y el Tiempo del sistema para el 19 de Septiembre del 2016.....	107
Figura 62	Gráfico del seguimiento del Tiempo TSV y Tiempo del sistema para el 20 de Septiembre del 2016.....	109
Figura 63	Gráfico del error producido entre el TSV y el Tiempo del sistema para el 20 de Septiembre del 2016.....	109
Figura 64	Gráfico del seguimiento del Tiempo TSV y Tiempo del sistema para el 21 de Septiembre del 2016.....	111
Figura 65	Grafico del error producido entre el TSV y el Tiempo del sistema para el 21 de Septiembre del 2016.....	111
Figura 66	Gráfico del seguimiento del Tiempo TSV y Tiempo del sistema para el 22 de Septiembre del 2016.....	114
Figura 67	Gráfico del error producido entre el TSV y el Tiempo del sistema para el 22 de Septiembre del 2016.....	114
Figura 68	Planta de Generación Híbrida.....	121
Figura 69	Producción de Electricidad para el año 2007 y del 2020	122

RESUMEN

La humanidad ha hecho uso de las energías convencionales hasta entrar en un proceso de agotamiento de las mismas en la era actual, sin embargo, el hombre, consiente de la afectación al planeta y a las futuras generaciones, está desarrollando sistemas basados en energías renovables. De estos sistemas, aquellos que utilizan la radiación solar, y que han entrado en uso comercial son los fotovoltaicos y térmicos, y dentro de estos últimos aquellos que son aplicables a equipos de baja temperatura y media temperatura. La técnica aplicada en instalaciones de media temperatura utiliza sistemas de concentración de la radiación solar y una de estas aplicaciones son los sistemas Cilindro parabólicos, que consiste en un espejo con forma cilindro parabólica con seguimiento solar, el cual concentra los rayos en un tubo absorbedor, el calor producido es aprovechado en forma de energía térmica en alguna aplicación determinada como puede ser generación de energía eléctrica. En el Ecuador esta tecnología no ha tenido desarrollo todavía, la ESPE en su afán de investigar la aplicación de energías renovables, está incursionando en un prototipo de esta clase de sistemas, el presente trabajo tiene por objeto desarrollar un sistema de seguimiento solar, basado en el uso de algoritmos matemáticos para la ubicación del sol, y construir un prototipo de seguidor solar mediante la utilización de elementos electromecánicos y electrónicos de uso comercial, el equipo así construido podrá ser la base para futuros desarrollos tecnológicos con fines investigativos, comerciales e industriales.

PALABRAS CLAVE:

ENERGÍAS RENOVABLES

CILINDRO PARABÓLICOS

SEGUIDOR SOLAR

ABSTRACT

Mankind has made use of conventional energy up until recent times, up to a point in which our natural resources are being used up. Due to the awareness of how this will affect the planet and future generations, renewable energy based systems are now being developed. Within these renewable energy systems, solar radiation, which uses photovoltaic and thermal systems, and has already been commercialized, is used with equipment with low and medium temperatures.

The technique used in installations with medium temperatures uses systems with concentrated solar radiation and one of these applications is parabolic cylinder systems, consisting of a mirror shaped parabolic cylinder with solar tracking, which concentrates solar rays into an absorber tube. The heat generated is harnessed in the form of thermal energy, and can be used as electric power.

In Ecuador this technology has not been developed yet. ESPE, in its desire to research the application of renewable energy, is experimenting in a prototype of this type of systems. This paper aims to develop a solar tracking system, based on the use of mathematical algorithms for the location of the sun, and build a prototype of solar tracking, using electromechanical and electronic elements. This Prototype will be the basis for future technological developments for research, commercial and industrial purpose.

KEYWORDS:

RENEWABLE ENERGY

PARABOLIC CYLINDER

SOLAR TRACKING

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1 ANTECEDENTES

La Tierra está siendo afectada por la polución, contaminación y uso excesivo de energía, principalmente de origen fósil, estos aspectos determinantes en el deterioro de la calidad de vida de la humanidad, han llevado a la toma de conciencia sobre la necesidad de un futuro sostenible y sustentable del hombre sobre el planeta. Esta necesidad, ha permitido generar nuevos avances científicos y tecnologías amigables con el ambiente.

La energía solar se ha constituido en una de las principales fuentes de energías renovables, sus principales usos se han manifestado en sistemas para generación eléctrica y térmica. Dentro de este último proceso, la aplicación más sencilla va desde el secado de objetos al ambiente, ante la presencia del sol, hasta usos más sofisticados basados en sistemas de concentración de radiación solar de alta temperatura.

La situación geográfica del Ecuador permite que se tenga un gran potencial de aprovechamiento de este recurso, su posición en el planeta determina que posea la mayor cantidad de horas de sol y radiación solar, sin embargo, el desarrollo tecnológico actual en el país es insipiente, y por lo tanto, el aprovechamiento de la energía del sol es mínima. En tales circunstancias, con el estudio de la radiación solar en nuestro país, la adaptación de tecnologías probadas, y/o el desarrollo de nuevas tecnologías que se apliquen a mecanismos de aprovechamiento de la energía solar, sumado a equipos que sean amigables con el usuario, se obtendrán resultados que motive el interés de inversionistas privados y sector público, para dar un uso investigativo, comercial e industrial futuro con tecnología propia.

En este proceso, la ESPE a través del Departamento de Energía y Mecánica, ha planteado el desarrollo de un proyecto para la construcción y funcionamiento de un prototipo basado en un sistema cilíndrico parabólico. Los diferentes componentes de este sistema han sido desarrollados con base de un megaproyecto de investigación y desarrollo, para la graduación de egresados de la maestría en energías renovables, cuyo principal tema es la Investigación y Desarrollo de aplicaciones de la energía solar térmica de media y alta temperatura para trigeneración (trabajo, frío, calor) utilizando sistemas de concentración, el componente correspondiente a esta Tesis desarrolla un sistema de seguimiento solar en un eje.

1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Los sistemas basados en energía solar, principalmente aquellos que utilizan sistemas de concentración de la radiación, maximizan su potencial energético mientras mayor sea la cantidad de energía que reciben del sol, esto se conseguirá si dichos sistemas apuntan directamente al sol durante el transcurso del día, sin embargo, el prototipo construido que corresponde a un concentrador cilíndrico-parabólico desarrollado por el Departamento de Energía y Mecánica de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, no posee este mecanismo de seguimiento y por lo tanto no puede recibir la máxima radiación diaria.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 GENERAL

Desarrollar un sistema de seguimiento solar para la obtención de la máxima radiación solar sobre un sistema de espejos cilindro - parabólicos basado en la utilización de equipos y tecnología de uso comercial.

1.3.2. ESPECÍFICOS

- Analizar la geometría de concentradores de radiación solar y determinar un modelo matemático que determine los rangos de funcionamiento del elemento concentrador.
- Construir un sistema electrónico, electromecánico y de control que permita con precisión manejar de forma automática el sistema, obtener datos de su funcionamiento y procesarlos para determinar su comportamiento.
- Caracterizar los datos experimentales del prototipo con aplicación a potenciales modelos de utilidad que beneficien a los sectores productivos y a la comunidad.
- Evaluar de forma técnica, económica y ambiental el proyecto.

1.4 ALCANCE DEL PROYECTO

Realizar la construcción de un modelo prototipo que permita realizar un seguimiento óptimo de la posición solar utilizando:

- a) Un equipo electromecánico de uso comercial acoplado a una estructura auto soportante de un sistema de concentración de radiación solar directa para que realice el movimiento del sistema.
- b) Un equipo electrónico de uso comercial para que realice el control automático de este proceso.

1.5 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Uno de los componentes medulares del prototipo construido que corresponde a un concentrador cilíndrico-parabólico desarrollado por el Departamento de Energía y Mecánica de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, representa el desarrollo de un mecanismo que permita conseguir un seguimiento preciso del sol y el control de todo el sistema utilizando medios electrónicos, de esta manera se obtendrá la máxima radiación solar sobre los espejos del sistema de concentración cilíndrico-parabólico

El aparato así construido, será de vital importancia por tener una aplicación específica, basada en nuestra realidad, con uso de equipos simples, comunes, de uso comercial y que genere el conocimiento suficiente para ser reproducido a escala industrial.

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE DE SISTEMAS DE CONCENTRACIÓN

La Energía es el principal instrumento del hombre para su desarrollo, la demanda de energía año tras año va creciendo. El petróleo por ahora es una de las mayores fuentes energéticas cuyo suministro se agota y cuya demanda no podrá cubrirse en el futuro. Por lo tanto, las energías renovables serán la solución, principalmente, para aquellos países que no poseen petróleo y buscan tener independencia energética.

Dinamarca le ha apostado a la energía eólica marina, Francia a la nuclear, aquellos países cercanos a la línea ecuatorial le han apostado a la energía solar aprovechando su mayor radiación como son California (EEUU), España, Italia, Grecia, Países del Norte de África, Emiratos Árabes, como otros, ha desarrollado proyectos fotovoltaicos y termosolares, la AIE (Asociación Internacional de Energía) considera que para el año 2050 el 46% provenga de energías renovables. (Meñat Salidegoitia, 2008, pág. 562).

Los países desarrollados, en el proceso de investigación de las energías renovables respecto de aquellas que tienen como fuente primaria de energía, la radiación solar, han surgido dos tecnologías que están en la fase de desarrollo e implementación industrial, frente a otras que se encuentran todavía en fase de desarrollo científico y tecnológico, están son: La energía eléctrica producida por paneles fotovoltaicos, y la otra, correspondiente a la energía térmica producida por sistemas cilindro-parabólicos.

Considerando que estos sistemas son conectados a la red, denominados EN LINEA, los sistemas fotovoltaicos son mucho más sencillos de instalar, sin embargo, la principal desventaja para los países desarrollados, es la dependencia tecnológica generada, ya que sus componentes, al ser altamente especializados, los elaboran muy pocas fábricas en el mundo, principalmente ubicadas en China. En los sistemas Cilindro-parabólicos, la tecnología puede ser desarrollada localmente, no requiere alta especialización de sus componentes. Por otro lado, los sistemas de generación termo-solar se conectan a sistemas existentes como centrales termoeléctricas, en base a combustibles fósiles, creando así sistemas híbridos de generación.

Para nuestros países en vías de desarrollo, existe una dependencia tecnológica en cualquiera de los dos casos, casi todos los componentes determinantes de los sistemas son importados, sin embargo, los sistemas termosolares son más accesibles por tener elementos comúnmente utilizados en una variedad de sistemas industriales.

Cualquiera de las dos tecnologías mencionadas depende de la radiación directa, la cual será analizada a continuación.

2.1 RADIACIÓN SOLAR.-

2.1.1 EL SOL

De acuerdo a Bachiller, “El sol parece ser una estrella anodina situada en una galaxia anodina, en términos astronómicos, el sol se clasifica como una estrella de tipo espectral G2 y clase de luminosidad V, es decir “G2V” que es una forma rápida de decir una estrella enana y amarilla con temperatura de 5780°K compuesta de Hidrógeno 74% en masa, Helio 24,5 % en masa, y trazas de otros elementos pesados como son hierro, níquel, Oxígeno, Silicio, azufre, etc. Se encuentra a 26000 años luz del centro de la Galaxia en el borde interno del brazo espiral de Orión, el sol recorre 1 año luz cada 1400 años. “Las Estrellas que se consideran más parecidas son 18 Scorpii

(HD142633) e HIP56984 éstas se encuentran a 200 años luz”. Se dice que a menudo el sol es una esfera del gas en ebullición, cada segundo, unos 580 millones de toneladas de gas hidrógeno se convierten en helio, se consumen 5 millones de toneladas y producen 90000 millones de megatones de energía pura (Bachiller, 2009, pág. 372).

Todo lo anteriormente dicho se complementa con saber que su edad se considera en aproximadamente 4500 millones de años. Su masa corresponde a: 2×10^{30} Kg (unas 330 000 veces la masa de la Tierra). Con una densidad $1,41 \text{ Kg/ m}^3$. (Grossi, 2004, pág. 91).

El sol mientras produce energía nuclear, pierde masa, sin embargo, la radiación extraterrestre permanece constante.

2.1.2 RADIACIÓN SOLAR EXTRATERRESTRE

La radiación solar es energía electromagnética, se podría considerar como una lluvia de particular llamadas fotones que viajan a la velocidad de la luz, de todo este volumen de energía, una parte muy insignificante llega a la tierra ya que ésta se encuentra a 150 millones de km, sin embargo, aun así, llega una potencia 10000 veces mayor que la que proporcionan todas las fuentes de energía que el hombre emplea, La radiación solar es el motor principal del clima de nuestro planeta. (Pacco k, 2008, pág. 5).

De toda la radiación que emite el sol en su superficie, que es aproximadamente 60000 kW/m^2 , la que llega a la atmósfera terrestre es $I_{cs} = (1367 \pm 7) \text{ W/m}^2$, y es la cantidad de radiación sobre la capa superior de la atmósfera, sobre una superficie de 1 m^2 perpendicular a los rayos solares considerando una distancia media entre el sol y la tierra, a este valor se conoce como constante solar. (Grossi, 2004, pág. 92)

. 2.1.3 RADIACIÓN SOLAR TERRESTRE

Una vez que atraviesa la atmósfera terrestre, esta radiación es parcialmente absorbida, y solo unos 1000W/m^2 alcanzan el mar

perpendicularmente en un día claro, si se toma en cuenta el ángulo, la trayectoria recorrida, la absorción y la difusión de la atmósfera, resulta que el nivel medio de radiación llega a unos 250w/m^2 y esto en el transcurso de un día corresponde a unos 6kW/m^2 por día, estos números son importantes para calcular el tamaño y rendimiento de plantas de energía solar. (Bachiller, 2009)

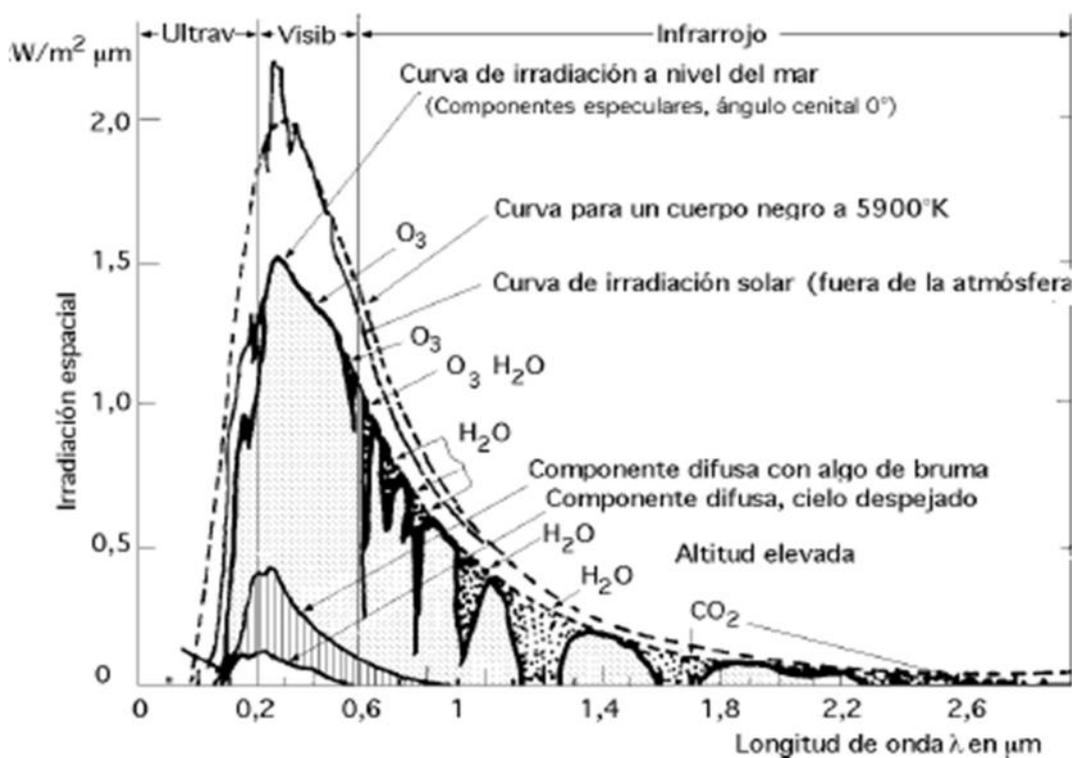


Figura 1: Distribución del Espectro de la Radiación solar

Fuente: (GROSSI GALLEGOS, pág. 6)

Según el gráfico se puede observar las curvas que presentan la irradiación solar extraterrestre, la irradiación de un cuerpo negro a 5900°K y la irradiación a nivel del mar, como se observa, los espacios más oscuros de la curva a nivel del mar, corresponden a las bandas de absorción por los diferentes componentes en la atmósfera como son: El O₃, el H₂O y el CO₂, los cuales cautivan la irradiación principalmente en la banda del infrarrojo.

La radiación emitida por el sol, tiene un amplio espectro de longitudes de onda, se concentra en un 97,8% en la zona que corresponde entre los 0,2 μm y los 3,0 μm, el máximo se encuentra en 0,48 μm. Como se puede

observar aproximadamente el 40% de esta energía se encuentra en la banda visible entre 0,2 y 0,6 μm , el 51% está en la radiación infrarroja mayor a 0,6 μm , y el 9% es radiación ultravioleta, bajo el 0,2 μm . En la Figura 1 se ha representado el espectro de la distribución de la irradiación solar extraterrestre y a nivel del mar (Jutglar, 2004, pág. 19)

2.1.4 MEDICIÓN DE LA ENERGÍA SOLAR INCIDENTE SOBRE EL SUELO.

En función de cómo inciden los rayos solares se pueden distinguir tres componentes de la radiación solar:

La radiación solar directa es uno de estos componentes, representa entre el 80% y el 90% de toda la energía solar que llega a la superficie de la tierra, en un día nublado esta componente es cero, esta radiación se identifica porque produce sombras cuando un cuerpo se interpone al sol. El otro componente es la radiación difusa y se presentan cuando la radiación solar sufre cambios por pequeñas partículas suspendidas en la atmósfera, en las nubes, etc., es difundida en todas las direcciones, esta radiación no produce sombras, el tercer componente es la radiación de albedo, es aquella radiación reflejada por la superficie terrestre y otros cuerpos cercanos, depende del coeficiente de reflexión sobre la superficie. La radiación solar global es la suma de estos tres componentes. (Quintero Restrepo, 2015, págs. 28-30).

Como ejemplo, tenemos que Colombia presenta un cuadro de la energía solar por regiones, estos pueden representar valores referenciales de la energía solar incidente también para el Ecuador por su cercanía geográfica.

Tabla 1

Disponibilidad Promedio anual de energía solar por regiones

REGIÓN	kWh/m ² /año
GUAJIRA	2.19

COSTA ATLÁNTICA	1.825
ORINOQUÍA	1.643
AMAZONÍA	1.551
ANDINA	1.643
COSTA PACÍFICA	1.278

Fuente:(Quintero Restrepo, 2015, pág. 35)

Podríamos hablar de que existe una radiación, la que será la Potencia solar (W/m^2) y se denomina Irradiancia, y la Energía solar (J/m^2) y se llama Irradiación. La radiación global se mide con un equipo denominado piranómetro colocado sobre una superficie horizontal.

Este equipo se basa en la diferencia de temperaturas entre dos superficies encerradas en una cámara semiesférica de vidrio, como se puede ver en la figura 2.



FIGURA 2: Piranómetro

Fuente: Equipo de Lab. de Energías Renovables ESPE

La radiación difusa se mide también con un piranómetro colocado sobre una superficie horizontal.

Este incorpora un disco de sombreado, para evitar la visión del disco solar (lo que elimina la componente directa) en su recorrido diario.

La radiación directa se mide sobre una superficie perpendicular a los rayos solares, el instrumento se denomina pirheliómetro y es similar a los piranómetros.

Este aparato posee un par termoeléctrico, una de sus uniones se coloca sobre una superficie receptora de color negro, alojada en el interior de un tubo, y con un seguimiento constante del Sol. Todo este aparato se encuentra acoplado sobre una montura ecuatorial. La figura 3, muestra este aparato.



Figura 3: Pirheliómetro de respuesta rápida 0 - 2 000 W/m²

Fuente: Thermal Sensors

2.1.5 POSICIÓN DEL SOL

Existen 4 movimientos elementales de la tierra respecto al sol que son: traslación, nutación, precesión y rotación.

La oblicuidad de los planetas es el ángulo entre el plano ecuatorial de un planeta y su plano orbital y por convección de la Unión astronómica Internacional (IAU), el polo norte de un planeta está por encima del plano de la eclíptica. (Roncero E. & Jiménez F, 2011, pág. 40).

De acuerdo a (Conde C, 2007), las variaciones de la distancia entre nuestro planeta y el sol hacen que no todo el año se reciba la misma

cantidad de energía proveniente de éste, así la tierra se encuentra más cerca del sol en marzo que otros meses del año en su proceso de rotación alrededor del sol, su trayectoria es una elipse que ha cambiado varias veces su forma a la largo de la historia de la tierra. Su eje de rotación ha variado su inclinación en los dos últimos millones de años de $24,5^{\circ}$ a $21,5^{\circ}$. Este eje es la línea imaginaria que une al Polo Norte con el Polo Sur. Producto de esta inclinación existen las diferentes estaciones del año. Durante el verano, por ejemplo para México, entre Junio y Agosto el hemisferio norte está más inclinado hacia el sol, mientras que el Hemisferio sur está más alejado, aunque la tierra por efecto de su traslación ya no éste lo más cerca al sol. En los meses entre diciembre y febrero, el hemisferio sur se encuentra inclinado y más cerca del sol, y por lo tanto, estará en verano. (pág.18).

El movimiento de traslación dura 365 días con 5 horas y 47 minutos, estas casi 6 horas se acumulan y cada 4 años se tiene el año bisiesto con 366 días, la trayectoria elíptica tiene 930 millones de kilómetros, a una distancia media del sol de 150 millones de kilómetros, la rapidez media de desplazamiento de la tierra es 29,5 km/s. (Severino, 2012, pág. 4)

En el proceso de traslación, el plano que forma el ecuador con la dirección del sol, se llama declinación. Para el hemisferio norte, el mayor ángulo de incidencia, coincide con la posición de la tierra más alejada del sol y corresponde a 23 grados y 27 minutos, acercando el polo norte hacia el sol. Es cuando se produce el solsticio de verano (22 de Junio), en el solsticio de invierno (23 de Diciembre), coincide con la distancia mínima, el ángulo es 23 grados y 27 minutos y es cuando el polo norte se encuentra más alejado del sol.

En las estaciones intermedias este ángulo es nulo y se tienen los denominados equinoccios de primavera (21 de Marzo) y de otoño (23 de Septiembre). En la figura 4 se observa el ángulo de declinación que mantiene el plano de la línea equinoccial con el plano de traslación en época de invierno y verano.

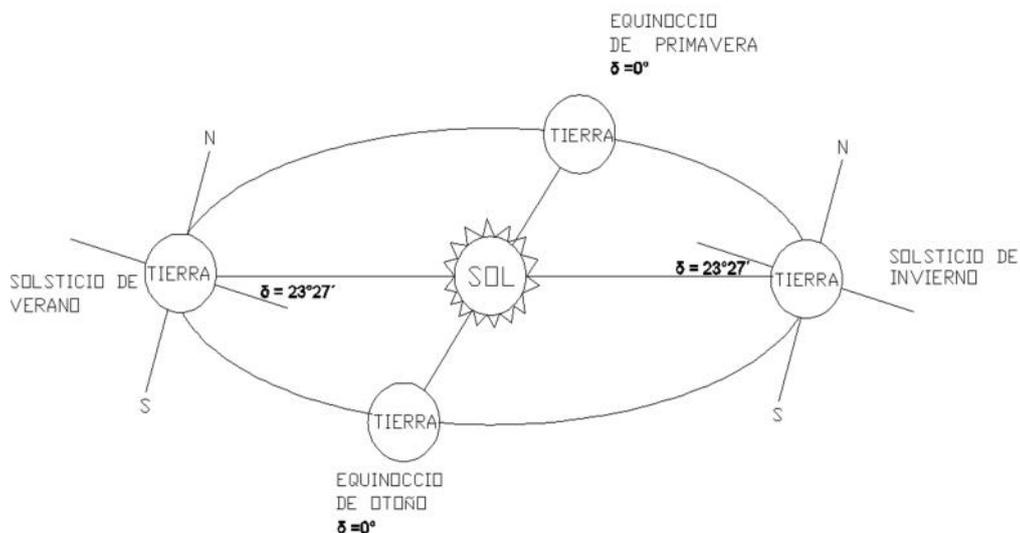


Figura 4: Variación del ángulo de declinación a lo largo del año

Fuente: (Jutglar, 2004, pág. 12)

La tabla 2 muestra un día tipo, que indica la declinación que tiene la tierra para cada mes.

Tabla 2:

Valores medios de declinación

MES	DIA TIPO	DECLINACIÓN
Enero	17	-20,7
Febrero	15	-12,6
Marzo	16	-1,7
Abril	15	18,9
Mayo	15	9,8
Junio	10	23
Julio	17	21,2
Agosto	17	13,4
Septiembre	16	2,6
Octubre	16	-8,9
Noviembre	15	18,5
Diciembre	11	-23

Fuente: (Jutglar, 2004, pág. 13)

Por otro lado la tierra tiene un movimiento de rotación, sobre el eje del mismo nombre, su giro es en dirección Oeste- Este, esto hace que la mitad del globo terrestre quede iluminado, mientras que la otra mitad está a oscuras, es decir el día y la noche, esto genera un movimiento aparente que da la impresión de que el cielo gira alrededor del planeta. El movimiento de precesión de la tierra implica que la inclinación del eje terrestre varíe con una frecuencia incierta y depende entre otras causas de los movimientos telúricos. Tal es el caso que en febrero del 2010, varió el eje terrestre en 8 centímetros aproximadamente por causa del terremoto de 8.8° Richter que afectó a Chile, en el año 2004 el tsunami del sudeste asiático desplazó en 17,5 centímetros al eje terrestre. La nutación es la oscilación periódica del polo de la tierra alrededor de su posición media en la esfera celeste debido a las fuerzas externas de atracción gravitatoria entre la Luna y el sol con la Tierra, esta oscilación es similar a un trompo cuando pierde fuerza y está a punto de caerse (Severino, 2012, págs. 3-8).

Las modificaciones en la rotación, órbita e inclinación de la Tierra, han originado cambios radicales en el clima planetario. Éste es el caso de las glaciaciones, producto del cambio en la forma de la órbita y la inclinación del eje de rotación, la última glaciación presentó su máximo enfriamiento entre 18 mil y 24 mil años atrás, este enfriamiento acumuló hielo en los continentes y el nivel del mar bajo unos 130 metros respecto del nivel actual, por ahora nos encontramos en un período interglaciar. Todo esto demuestra que los cambios en la energía del sol, así como cualquier cambio en la rotación, órbita o inclinación de la tierra han producido y producirán cambios climáticos naturales en todo el planeta. A esto se denomina cambio climático global. (Conde C, 2007, pág. 19).

2.1.6 ÁNGULO DE DIRECCIÓN DE LA RADIACIÓN

Existen dos ángulos que determinan la posición de cualquier punto sobre la tierra. Por ejemplo Baltimore, Maryland (EEUU) tiene una latitud de 39,3 grados norte y longitud de 76,6 grados Oeste, esto quiere decir que la latitud es el ángulo entre cualquier punto y el ecuador, las líneas paralelas al

ecuador se llaman paralelos, por ejemplo para nuestro país, le corresponde la latitud 0° . La longitud es el ángulo de que se mide a lo largo de la línea equinoccial hasta el meridiano de Greenwich (longitud 0°) de la proyección de cualquier punto sobre la línea ecuatorial. La insolación terrestre depende de la latitud, lo rayos solares llegan a la tierra prácticamente paralelos, la inclinación con que estos rayos inciden sobre la tierra depende de la latitud y la inclinación, Por ejemplo en la zona cercana al ecuador, a medio día caen casi verticales. (Severino, 2012, págs. 11-13) .

La figura 5 muestra la inclinación de la tierra respecto de la incidencia de los rayos solares, además se indican los paralelos más importantes.

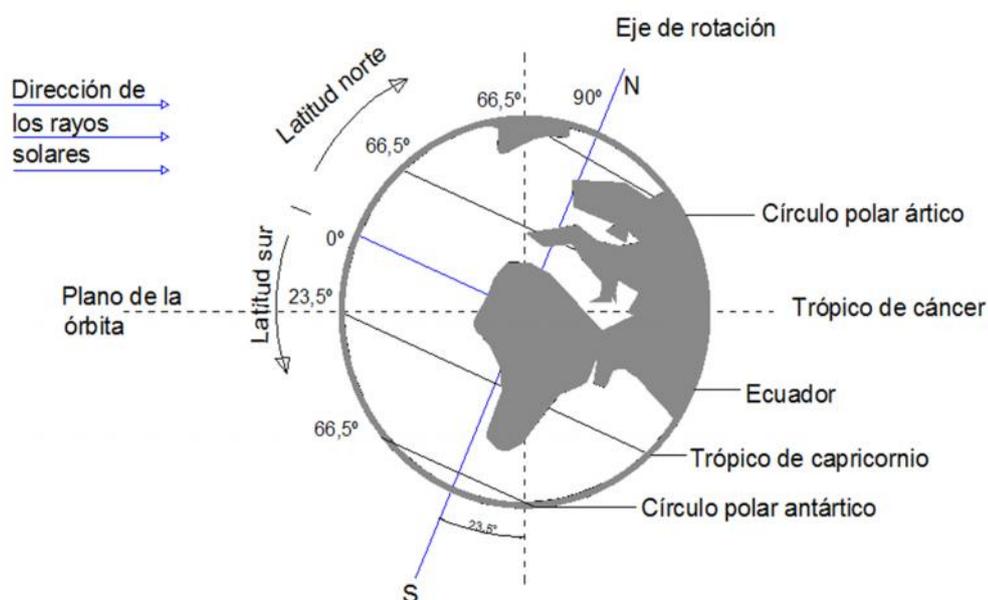


Figura 5: Incidencia de los rayos solares en el solsticio de invierno 23 de Diciembre.

Fuente: (Jutglar, 2004, pág. 11)

2.1.7 RADIACIÓN SOLAR SOBRE SUPERFICIES INCLINADAS

Si se tiene una superficie inclinada, la radiación sobre esta dependerá con que ángulo de incidencia llegan los rayos del sol sobre la misma.

La cantidad de energía media mensual que recibe una superficie inclinada es distinta a la horizontal. Para obtener el valor en plano inclinado

debe utilizarse factores de corrección que dependen de la ubicación geográfica de la superficie, su pendiente o inclinación, el albedo local, el día del año y el coeficiente de claridad atmosférica. Por lo tanto para determinar la radiación sobre una superficie inclinada es necesario determinar la irradiación extraterrestre sobre el plano horizontal, luego se determina la irradiación incidente sobre una superficie en el suelo terrestre sobre el plano horizontal, a continuación es necesario determinar el factor de corrección para la irradiación que llega al plano inclinado y depende del ángulo del plano inclinado respecto de la horizontal sobre la superficie terrestre en ese punto. (Navntoft, 2008).

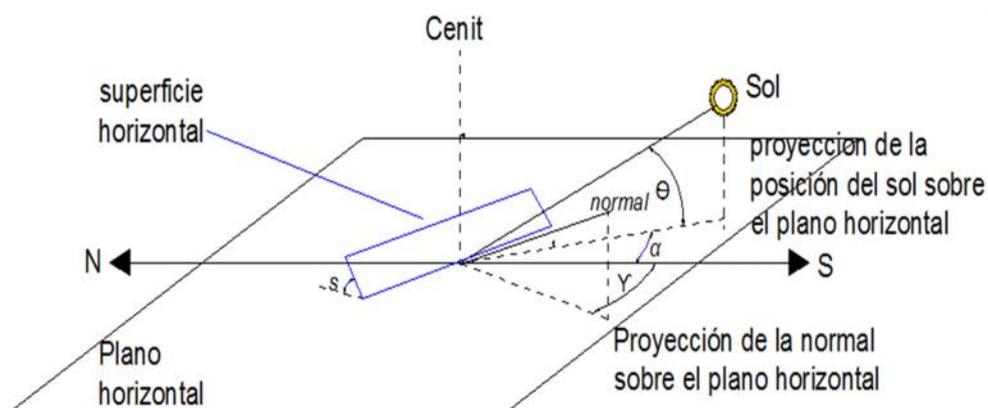


Figura 6: Trayectoria aparente del sol respecto de un punto P en la superficie terrestre

Fuente: (Jutglar, 2004, pág. 27)

2.2 SISTEMAS DE CONCENTRACIÓN

2.2.1 TÉCNICAS DE CONCENTRACIÓN

Existen 2 modos básicos de aprovechar este recurso: La tecnología fotovoltaica y la tecnología termo-solar. La tecnología fotovoltaica permite la conversión directa de la energía solar en electricidad. La tecnología termo-solar, se puede utilizar de dos maneras: Para la generación de electricidad y el aprovechamiento directo del calor. Los sistemas termosolares para calentamiento a bajas temperaturas (hasta los 90°C) son utilizados básicamente para el calentamiento de agua de uso doméstico, mientras que

los sistemas que utilizan técnicas de concentración y que operan a medias temperaturas (150°C a 400°C) y altas temperaturas (superiores a 400°C) permiten el aprovechamiento del calor para usos industriales o generación eléctrica. (CIEEPI -ISSN 2477-8958, 2016)

Dependiendo de la técnica de concentración de la radiación solar se consigue trabajar en baja, media o alta temperaturas.

2.2.1.1 Equipos foto térmicos de baja temperatura

Los equipos foto-térmicos de baja temperatura han sido desarrollados para ser utilizados como aprovechamiento directo del calor, normalmente son equipos pasivos, es decir, no ocupan energía o usan muy poca energía de otra naturaleza como apoyo, tal es el caso de los sistemas de calentamiento de agua de uso residencial, que para alcanzar los niveles de confort deseado, utilizan otras fuentes de energía como es la eléctrica para cierre de válvulas, para control del temperatura, etc., sin embargo, también existen equipos activos que mediante el uso de bombas, consiguen mover el fluido que ha captado el calor.

Estos equipos básicamente utilizan el principio del colector plano, que no es más que una superficie captadora del calor normalmente metálica, asociada a un serpentín de tubos metálicos, por los cuales se mueve un fluido que recoge el calor generado, su temperatura de trabajo normalmente llega a 70° centígrados.

El desarrollo tecnológico, ha sido dado principalmente por las empresas fabricantes, y ha avanzado conforme las múltiples aplicaciones que se da a estos sistemas, el concepto ha sido captar más calor para ganar temperatura de trabajo, y que a su vez no existan pérdidas de calor por el envolvente del equipo. Estos equipos ha ido evolucionando hasta tener dos partes bien definidas que son: el tanque almacenador del fluido y el colector del sistema. En tal caso el análisis se centrará en el análisis del colector del sistema, como elemento principal y de hecho el que hace la diferencia entre los equipos fototérmicos de baja temperatura.

En un principio como se indicó el sistema colector era del tipo plano, sin embargo, en la actualidad, este elemento ha ido transformándose en sistemas mucho más eficientes. El estado del arte de estos sistemas consiste en múltiples captadores, con funcionamiento individual, que se conectan a un tanque almacenador, cada captador solar consiste en un tubo de vidrio al vacío, por lo que las pérdidas de calor son menores, en su interior tiene un tubo concéntrico para la absorción de calor de menor diámetro, recubierto por una pintura selectiva. El fluido que recoge el calor es de diferentes sustancias, suele ser aceite térmico o glicol, este fluido se encuentra en un bucle dentro del tubo de absorción, retirando el calor de éste y llevando a un punto donde entrega el calor para regresar al tubo de absorción. Normalmente con estos tubos de vacío, es posible calentar agua hasta unos 110°C. El rendimiento de los paneles con tubos de vacío, es muy superior al colector plano de placa de absorción. (Madrid vicente, 2009, pág. 106).

De acuerdo a (Fernández Salgado, 2010), clasifica a las diferentes técnicas de construcción de los tubos de vacío en la actualidad de la siguiente forma:

- Heat Pipe. Tiene un tubo de vidrio al vacío con un tubo absorvedor concéntrico y existe una pequeña cantidad de fluido al interior que se evapora cuando está expuesta al sol, asciende por el tubo a la parte superior y se condensa al ceder el calor al tanque absorvedor.
- Flujo Directo.- Es un tubo de vidrio que contiene un tubo de metal asociado a una aleta metálica de forma similar al colector plano.
- Sydney.- El criterio de construcción para este tipo de tubo de vacío es usar una ampolla interna donde llega el fluido absorbente desde afuera y toma el calor del fluido de trabajo interno, tiene internamente un reflector interno al tubo que ayuda a la concentración de rayos solares sobre el tubo del fluido.

- Schott.- Este posee doble tubo de cristal, el fluido de trabajo está en el tubo interior de vidrio, este tubo interno tiene el recubrimiento de una superficie selectiva para los rayos solares, no tiene problemas de esfuerzos mecánicos por dilatación, y posee como el anterior un reflector interno.
- Tipo CPC.- es cualquiera de los anteriores pero tiene un reflector de tipo cilíndrico que concentra los rayos solares sobre el tubo, inclusive la radiación difusa.(págs. 72-74)

La figura 7 ilustra el principio de funcionamiento de los sistemas descritos en base a tubos de vidrio.

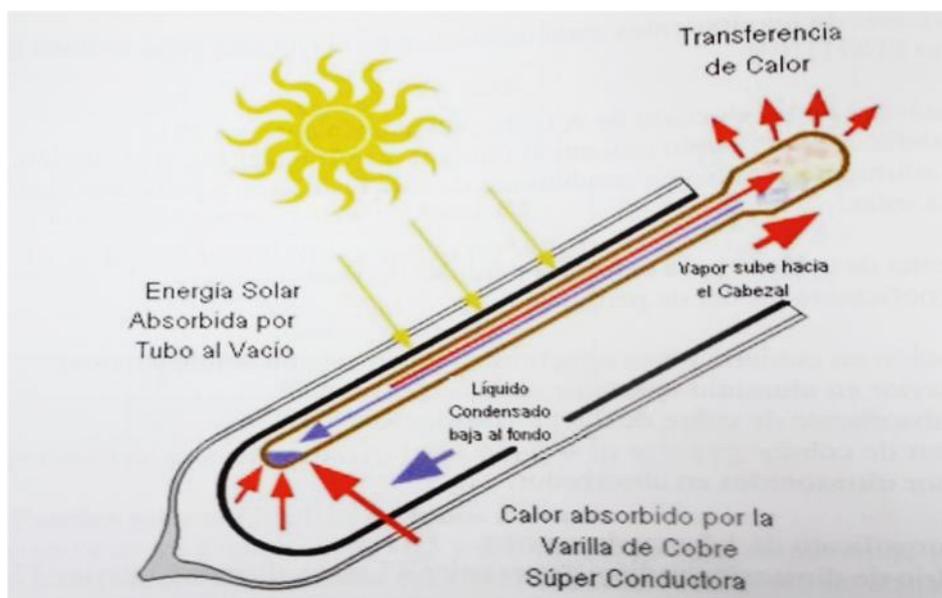


Figura 7: Principio de Funcionamiento de un colector térmico de tubos

Fuente: (Madrid vicente, 2009, pág. 108)

2.2.2 GEOMETRÍA DE CONCENTRADORES

El estado del Arte para los sistemas que conllevan una geometría de concentración, corresponde a aquellos que trabajan en media y alta temperatura.

Existen 2 clases de sistemas de concentración, aquellos que son sistemas lineales de concentración, y consisten en que los rayos solares se

concentren a lo largo de un tubo recto que lleva un fluido y que es llevado a altas temperaturas, y los que son sistemas puntuales de concentración, y que tratan de concentrar los rayos solares en un punto, así se consigue elevar mucho más la temperatura. (Llorente Sánchez, 2015, pág. 11)

El desarrollo tecnológico de estos sistemas ha sido importante en los últimos años y su principal aplicación está dedicada a la producción de energía eléctrica, agrupa un conjunto de tecnologías cuyo principal objetivo es alcanzar altas temperaturas. Por ahora se están desarrollando de tal manera que sus costes sean competitivos con otra clase de energías, y considerando que es una fuente de energía renovable y amigable con el ambiente.

Las primeras experiencias tratan hace unos 25 años, España con la central de Almería y EEUU con varias plantas de colectores cilíndrico parabólicos con capacidad total de 360 MW, principalmente ubicadas en California. En los Estados Unidos, con el apoyo de la Asociación de la Industria de Energía Solar (SEIA) y el ministerio de Energía se está participando en la creación de Empresas Solares, principalmente en aquellos estados con mayor Irradiación solar, teniendo como meta la creación de proyectos con capacidad de 1000 MW en un período de 7 años a partir del 2010. En algunos países en vías de desarrollo, tales como: India, Marruecos, Egipto, México, etc., Se encuentran en proceso de investigación con el apoyo del Banco Mundial y Banco de Inversiones Europeo. Una de las barreras más importantes que impide el desarrollo de estas tecnologías, es el desconocimiento por parte de los entes gubernamentales, políticos, e inversionistas, incluso de empresas del sector energético, la iniciativa del GMI o Iniciativa de Mercado Global, ente creado para expandir y desarrollar las instalaciones de plantas de concentración solar, hace que se acelere el conocimiento técnico, además de la creación de un marco político adecuado para el ingreso a una etapa comercial de estas tecnologías. Por lo tanto, uno de los objetivos globales es conseguir la instalación a manera comercial de un 5000 MW eléctricos. (Fernández Salgado, 2010, pág. 478)

La tabla No 3 muestra un cuadro comparativo de las características generales de diferentes sistemas de concentración.

Tabla 3

Características Generales de las Centrales Eléctricas Termo solares

	Cilíndrico Parabólicos	Heliostatos	Espejos Parabólicos
Potencia	30-320MW	10-200MW	5-24kW
Temperatura de operación	390°C	560°C	750°C
Factor de capacidad anual	23-50%	20-77%	24%
Eficiencia pico	20% (D)	23% (p)	29,4% (D)
Eficiencia Neta anual	11(d) -16%	7(d)-20%	12-24% (p)
Estado comercial	disponible	demostración	Prototipo
	comercial		demostración
Riesgo tecnológico	bajo	medio	alto
almacenamiento disponible	limitado	si	baterías
diseños híbridos	si	si	si
Coste W instalado			
Euros/m2	524-229	524-229	524-229
Euros/W	3,33-224	3,66-2,04	10,5-1,08
Euros/Wp	3,33-1,08	2-0,75	10,5-0,92

Fuente:(Romero Alvarez , 2006)

El rango de potencias es considerado entre 1997-2030 (D)= demostrada; (P) = predicha (d) = ha sido demostrado

2.2.3 ESPEJOS PARABÓLICOS Y LENTES

Los Espejos parabólicos consisten en un reflector parabólico que concentra la luz solar, en cuyo foco, se coloca un motor Stirling y un transformador, cada disco es un módulo independiente que genera electricidad a partir de la luz solar. (Llorente Sánchez, 2015)

Estos discos tienen su evolución tanto en Europa y EEUU, con motores Stirling instalados, los cuales han demostrado ser los más eficientes en la conversión de energía solar a eléctrica con valores que van entre 5 y 25 kW. (Romero Alvarez , 2006) La curvatura parabólica ha sido concebida para

tener altas relaciones de concentración, sobre los 1000 y 4000, con una relación distancia focal/diámetro de 0,6 lo que implica, que se han conseguido temperaturas entre 650 y 800°C, con eficiencias del motor Stirling entre el 30 y 40%. (Fernández Salgado, 2010)

La elaboración del concentrador tiene una tecnología bastante avanzada para su fabricación, es una membrana de acero inoxidable tensionada con moldeo hidroneumático, la membrana se construye a una presión negativa de 20 a 50 mbares y conformada la membrana se pegan los vidrios de 0,9 mm de espesor de 50x30 cm². El estado del arte de los Espejos Parabólicos en sus primeros inicios estuvo caracterizado por altas concentraciones (3000) y excelentes resultados pero a precios muy altos y estructuras muy pesadas sobre los 100 kg/m². (Romero Alvarez , 2006)

El disco Vanguard fue operó en Rancho Mirage (California) por 18 meses su superficie era de 86m² y tenía un motor generador de 24 kWe, posee un rendimiento de 30% de conversión neta y tiene el record mundial. En la actualidad hay otros desarrollos en EEUU que involucran a las Empresas LaJet, SolarKinetics SAIC, Acurex y WG, en Europa los principales desarrollos han sido llevados por Steinmuller y Schlaich, Solo Kleinmotoren, con unidades de 4,5 a 8,5 metros de diámetro, en Almería, en las cuales se han tenido menores costos pero a su vez menores rendimientos. (Fernández Salgado, 2010) La figura 8 ilustra la estructura de un espejo Parabólico con Motor Stirling en el foco.



Figura 8: Colector solar de disco Parabólico con Motor Stirling

Fuente: (Llorente Sánchez, 2015, pág. 12)

2.2.4 HELIOSTATOS Y TORRES DE POTENCIA SOLAR

Las torres de potencia solar consisten en un campo de elementos reflectantes que siguen la posición de sol a cada instante, de tal manera que orientan el reflejo de los rayos solares hacia la parte superior de una torre central, donde se encuentra el elemento receptor, las potencias que se maneja son en el orden de 10 a 200 MW con una capacidad de concentración de 200 a 1000 veces. Estos sistemas trabajan a altas temperaturas y tienen una capacidad de generar electricidad mediante un proceso de almacenamiento térmico. El fluido de trabajo suele ser Sodio líquido, vapor, nitrato Fundido, Sales de alta tecnología, aire, y el medio de almacenamiento de la energía suele ser Sodio, Sal Nitrato, Aceite, sal de alta tecnología, cerámico. (Fernández Salgado, 2010, pág. 439)

Las primeras torres de potencia solar fueron desarrolladas en España, como los proyectos SSPS y CESA 1, en Italia el proyecto EURELIOS por el año 1981, a partir del año 1982 a 1984, EEUU desarrolló el proyecto Solar One, Francia lo hizo con el proyecto THEMIS, de igual forma lo hizo Japón y Rusia a manera de experimentación hasta antes de la década de los 90, luego, España y EEUU en la década de los 90, desarrollaron los proyectos TSA y Solar Two respectivamente, existe un gran número de centrales que quedaron a medio camino de su construcción, las referidas son las que se encuentran en funcionamiento. Las plantas de Almería y Solar One han permitido demostrar su viabilidad técnica con rendimientos reales de hasta 20% y con costos de 2,1 Euros/Wp. (Romero Alvarez , 2006, pág. 12)

EEUU ha preferido manejar sistemas solares puros, mientras que en Europa se está manejando sistemas solares híbridos (con otra fuente de energía), estos últimos tienen costos de producción eléctrica entre 0,1 y 0,15 Eu/kWh, mientras que los sistemas puros tienen costos entre 0,15 y 0,20 Eu/kWh, esta diferencia conlleva la ventaja de reducir barreras tecnológicas

e inversión inicial, de tal manera que resulta atractivo entrar en la instalación de torres solares comerciales. (Fernández Salgado, 2010, pág. 446) La figura 9 es una fotografía de un campo solar de heliostatos con una torre de potencia solar.



Figura 9: Torre para concentración solar.

Fuente: (Llorente Sánchez, 2015, pág. 14)

2.2.5 CONCENTRADORES CILINDRO PARABÓLICOS CCP

De los sistemas de concentración, estos son los que han llegado a una etapa industrial, consisten en equipos cuyo reflector tiene una superficie cilíndrica de perfil parabólico, la radiación se concentra en el foco de la parábola y a lo largo del perfil cilíndrico, que es un tubo por el cual viaja un fluido térmico, tiene un sistema de seguimiento unidireccional, debido a que solo puede aprovechar la radiación solar directa. Se puede conseguir temperaturas elevadas de hasta 450°C pero un tanto más bajas que los concentradores parabólicos, el grado de concentración oscila entre 30 y 80 veces, y las potencias en un campo pueden llegar a ser de 30 a 80 MW. El fluido de trabajo suele ser agua o Etilen Glicol cuando la temperatura de trabajo es menor a 200°C y aceites térmicos sintéticos para temperaturas hasta 450°C , Estas plantas suelen ser sistemas híbridos, carecen de sistemas de almacenamiento pero tienen calderos auxiliares que les permite suplir la necesidad energética en períodos de baja o nula insolación o alta nubosidad. (Romero Alvarez , 2006, pág. 7)

Los sistemas de CCP comparativamente con las otras tecnologías de concentración son las más desarrolladas y con aplicaciones comerciales en funcionamiento, las que cuentan con más experiencia son la plantas SEGS (solar Electricity Generating Systems) con 2,5 millones de metros cuadrados de instalación y una producción de 354 MWe en California, sin embargo la eficiencia del sistema se reduce a un 15% de la radiación solar, éste es el mejor ejemplo del estado del Arte de estos sistemas. El costo es alrededor de 0,15 a 0,20 Eu/kWe, su diseño y construcción no conlleva un desarrollo tecnológico elevado, sin embargo, es necesario subvencionarlas con incentivos fiscales, o la participación de entes como el Banco Mundial que promueven con recursos su aplicación en países en vías de desarrollo, y lo hace a través de empresas con experiencia en esta clase de sistemas, principalmente se está trabajando en países con alta insolación como son México, Marruecos, Egipto, India, Brasil, Paquistán. (Fernández Salgado, 2010, pág. 444)

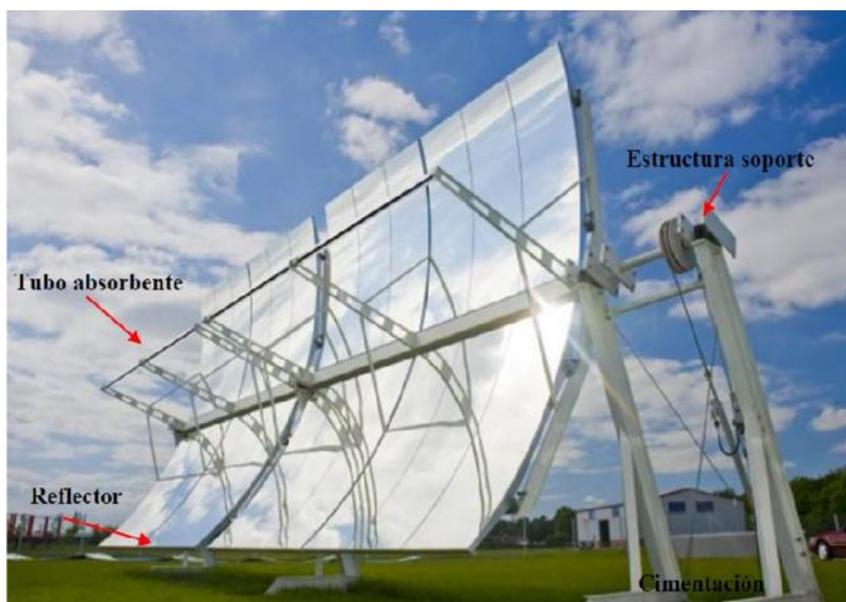


Figura 10: Diagrama esquemático de un CCP

Fuente:(Llorente Sánchez, 2015)

2.3 SISTEMAS DE CONTROL PARA LOS SISTEMAS DE CONCENTRACIÓN CILÍNDRO PARABÓLICOS

2.3.1 SENSORES

El estado del Arte para los sistemas de sensores de seguimiento del sol, se basa en 2 tecnologías desarrolladas que trabajan en forma independiente o la combinación de ambas, cuyo efecto mejora el comportamiento de los sistemas de seguimiento.

2.3.1.1. Sistemas de posicionamiento horario del sol.-

Consiste en obtener la situación del sol mediante un sistema de posicionamiento, utiliza la hora de salida y la puesta del sol, considerando que éste tiene un movimiento uniforme en la cúpula atmosférica, se puede programar a los sistemas que comiencen a realizar un seguimiento solar, con un ángulo determinado y a una hora determinada. El sistema contiene un algoritmo de cálculo de la posición del sol, en función de la hora del día y de las coordenadas del lugar, este algoritmo correrá en un ordenador.

También a este tipo de posicionamiento se llama con programación astronómica, Este tipo de seguidor presenta una total independencia de las condiciones climáticas ya que su algoritmo no requiere de sensores que indique donde está la mayor luminosidad. El seguimiento depende únicamente de una serie de ecuaciones que predicen la ubicación del sol en cualquier momento. Este tipo de seguidor resulta ser de gran precisión (Escobar Mejia, 2010, pág. 247)

2.3.1.2 Sistemas de Sensores electrónicos.-

Los sensores electrónicos que se utilizan en sistemas de seguimiento no son más que varios fotodetectores alineados, de tal manera, que comparan un nivel de iluminación de la luz incidente sobre éstos. La geometría de la disposición de éstos dentro de una estructura, hace que determine las posibles configuraciones para la detección del sol.

Estos sensores se colocan dentro de estructuras que buscan siempre que las radiaciones detectadas sean iguales, con esto se consigue que la plataforma siempre este orientada al sol Una barrera es colocada entre

ambos sensores para eliminar la radiación directa que incide sobre el sensor más alejado del sol. (Patrana , Oviedo , & Cogollo , 2006, pág. 811)

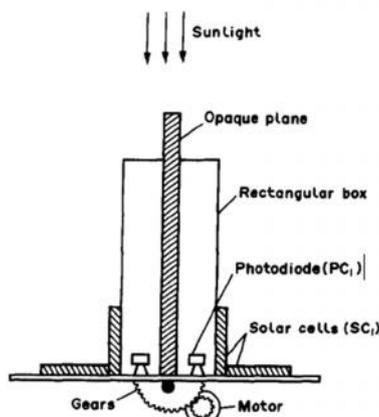


Fig. 1. Schematic diagram of sensing mechanism.

Figura 11: Diagrama Esquemático de un mecanismo sensor

Fuente: (R.I & Oduyemi, 1985)

2.3.2 SISTEMAS DE CONTROL DE SEGUIMIENTO SOLAR

El estado del arte de los sistemas de control parte de un sistema que determina una respuesta de salida a una entrada dada, en la práctica el control es multivariable, con varias entradas y salidas y la tarea de diseño puede complicarse por el acoplamiento inherente a la dinámica de la planta, sin embargo, es deseable considerar que una entrada n este asociada a una salida n con una realimentación n asociada a cada entrada y salida, esta configuración consideraría entonces un canal n . Si el acoplamiento es simple, la tarea de diseño se reduce a un conjunto de tareas de diseño SISO (una entrada, una salida) y un controlador escalar que puede ser diseñado para cada canal. La mayoría de los sistemas reales en la práctica son de múltiples entradas y múltiples salidas o sistemas multivariables. En los 60 alcanza la madurez el llamado Control Optimo, actualmente se conoce como Control LQG (LQG, Linear Quadratic Gaussian), su desarrollo coincidió con programas de investigación en Estados Unidos y la ex Unión Soviética, y principalmente fue aplicado a problemas de minimización de una función de costo (ejemplo: tiempo, error, pérdidas, etc.), eran fácilmente definidos y formulados como optimizaciones. (Anderson B. & Moore J., 1989, págs. 1-6)

A partir del LQG se da un giro significativo hacia la optimización H_2 para lograr controladores robustos, este desarrollo se originó en el trabajo de Zames (Zames G., 1981), el cual argumentaba problemas de robustez de los sistemas LQG ya que la representación de las perturbaciones inciertas por medio de procesos era normalmente irreal, como por ejemplo el ruido blanco. La IEEE Transactions on Automatic Control en 1981 publica un número especial sobre Sistemas de control Lineal Multivariable, con un artículo de Doyle y Stein (Doyle J. & Stein G., 1981) en particular que versa sobre cómo lograr los beneficios de la retroalimentación en presencia de incertidumbre no estructurada, también se introducen el uso de los valores singulares para el diseño de control multivariable, y se propone que el lazo de realimentación tradicional debe ser realizado con un controlador que de antemano garantice estabilidad. (págs. 4-16)

En los años 90 en el Reino Unido surge un nuevo marco de trabajo para sistemas de control Multivariable, conocido como Diseño por Canales Individuales (ICD, Multivariable Channel Design). Se basa en el análisis de la Función de Estructura Multivariable (MSF, Multivariable Structure Function) y en un proceso de diseño claro y transparente que permite la obtención de diseños de control multivariable robustos y sencillos ICD permite el análisis y síntesis de sistemas de control multivariables aplicando técnicas de control clásico basada en Nyquist/Bode. Ya que una vez que los canales han sido definidos es posible formar un lazo retroalimentado con un controlador diseñado específicamente para satisfacer especificaciones, así el problema de diseño se reduce al diseño de controles de una entrada y una salida para cada canal. El ICD tiene documentación limitada, a pesar que se puede diseñar sistemas de control simples y efectivos, esto es probable ya que algunos resultados han sido de naturaleza confidencial. Los ICD han sido reportados en redes de potencia de pequeña escala, generación distribuida, submarinos, procesos de combustión, industria automotriz y aeroespacial (Ugalde Loo C., 2016, pág. 32).

Sin embargo, los sistemas de control de seguimiento solar, son mucho más sencillos de los descritos anteriormente, en primer término si el funcionamiento del sistema es en base a la posición del sol, se puede considerar como un sistema en lazo abierto ya que dependen exclusivamente de la exactitud con la que se diseñe el reloj de seguimiento, y si se usan sensores lumínicos de posición básicamente se comportaría como el más sencillo de los sistemas de control donde se considera una entrada y una salida para sistemas de un solo eje.

Como los sistemas de control de seguimiento han sido aplicados tanto a los sistemas de colectores solares de concentración como a los sistemas fotovoltaicos. De estos últimos el valor medio la energía captada anualmente, cuando se compara el sistema con seguimiento frente a un sistema fijo ronda en un incremento del 33% y llega en casos puntuales hasta el 41%, esto determina la necesidad de desarrollar sistemas de seguimiento solar para mejorar los sistemas fotovoltaicos, sin embargo, para los sistemas de concentración es una necesidad. El funcionamiento del seguidor está condicionado a un buen funcionamiento mecánico y una buena estrategia de control que garantice que el sistema se encuentre siempre en la posición óptima, su fallo reduce el rendimiento y por lo tanto la rentabilidad.

Existen dos clases de sistemas el uno corresponde a los sistemas que utilizan el cálculo de la posición solar y se basa en un reloj en tiempo real que debe dar de la forma más precisa la fecha y la hora, esta información, junto a la latitud y longitud de la posición del sistema permite mediante cálculos matemáticos más o menos complejos, la determinación del sol en cada momento y con ella la orientación adecuada del sistema. Una vez resuelta la posición del sol en cada momento, es necesario manejar los actuadores eléctricos para posicionar correctamente el seguidor, es así que se recurre a una realimentación de la posición del sistema mediante sensores de posición absolutos o incrementales.

Por otro lado, existe otro tipo de sistema que se basa en el uso de sensores de radiación, suelen ser 2 o 3 sensores de luminosidad, que dispuestos adecuadamente, el sistema se orienta donde recibe la misma luminosidad en todos los sensores, en tal caso se supondrá que se ha conseguido la perpendicularidad con respecto del sol, Este sistema más sencillo respecto del reloj en tiempo real, suele llevar inconvenientes cuando hay una alta radiación difusa, o suciedad sobre los sensores produciendo movimientos erráticos e impredecibles. Existe la posibilidad de realizar un sistema híbrido con la ventaja que el posicionamiento inicial se realice mediante el cálculo de posición solar y un ajuste más óptimo se lo haga mediante sensores. (Palomar J. & Casanova P, 2009, pág. 675).

El avance de la electrónica ha permitido que los sistemas de control sean precisos, secuenciales, regulados, en tiempo real, basados en servosistemas que consisten en un sistema de control retroalimentado en el que la salida para este caso es un sistema de posición, velocidad o aceleración.

La Figura 12 muestra un diagrama de bloques que describe el funcionamiento del seguidor solar.

Según las VII Jornadas Nacionales y IV Internacionales de Investigación de la URBE, en el artículo “Estrategia de Control para un sistema concentrador Disco Parabólico acoplado a un Motor Stirling” Los sistemas de control para seguimiento, básicamente son electrónicos ya que los sensores y actuadores son electrónicos y eléctricos respectivamente, existen aquellos que tienen una electrónica exclusiva, propia y desarrollada para esta actividad, usa sistemas electrónicos microprocesados y elementos electrónicos discretos para realizar su control, El sistema o lazo de control estaría formado por varios subsistemas que se describen de manera general en la Figura 12.

Los otros sistemas consisten en aplicaciones basadas en PLC's (Programmable Logic Control) que son ordenadores industriales y permiten

ser programados para realizar una actividad específica, su grado de programación permite desarrollar interfaces hombre- máquina mucho más complejas y resulta mucho más amigable actuar o revisar las variables a ser controladas del sistema por un usuario determinado del mismo.

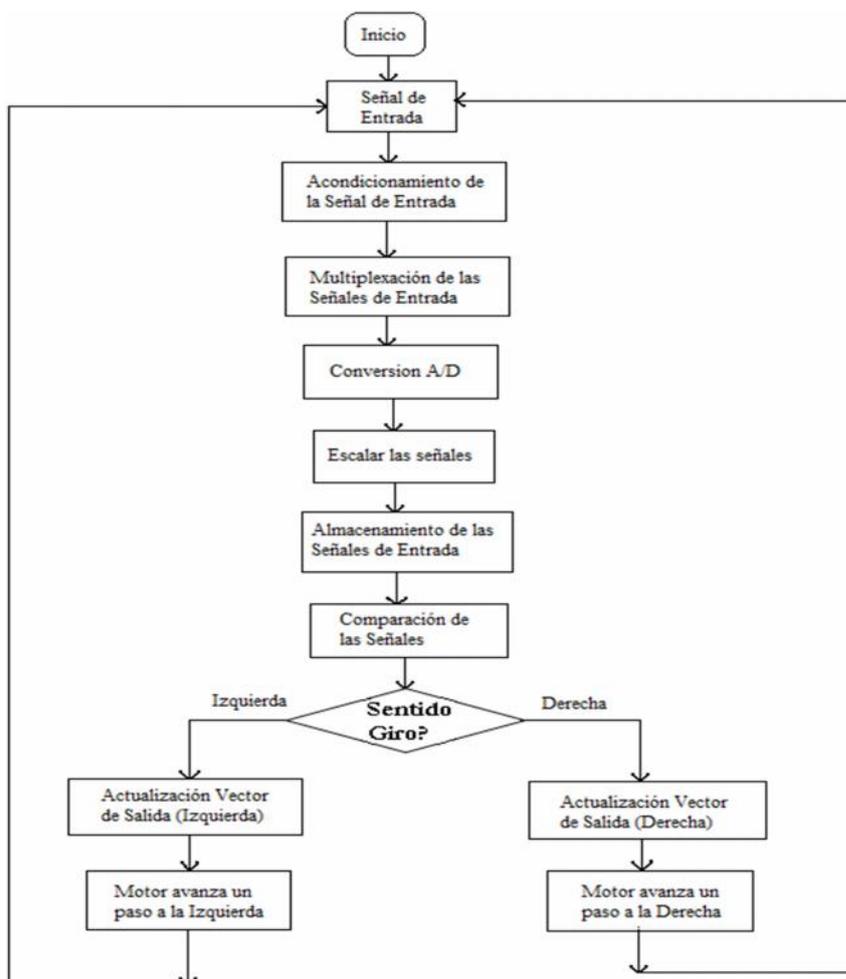


Figura 12: Descripción del funcionamiento de un seguidor solar de un solo eje

Fuente: (Escobar Mejia, 2010, pág. 245)

2.3.3 ACTUADORES PARA SISTEMAS DE SEGUIMIENTO SOLAR

La tecnología de seguimiento solar parte de una tecnología que fue aplicada para la orientación de antenas parabólicas satelitales, el movimiento de las mismas se realiza a dos sistemas en base a una cremallera de engranajes asociados a un motoreductor, con este antecedente, fue fácil migrar hacia los sistemas de seguimiento solar. Estos

elementos actuadores cuyo diseño se basa en la mecánica del sistema de seguimiento adoptado son sistemas hidráulicos, tornillos de potencia, sistemas de tornillo sin fin, motor eléctrico con motoreductor.

Existen varios tipos de actuadores basados en sistemas electromecánicos cuyo principal elemento es un motoreductor acoplado a los ejes del mecanismo, estos sistemas pueden ser en base a motoreductores acoplados entre ellos, en tal caso el movimiento es angular sobre el eje. (Palomar J. & Casanova P, 2009, pág. 673).



Figura 13: Sistema de Seguimiento Solar.

Fuente: Cortesía PANASONIC

Otro mecanismo es en base a un acople motoreductor – tornillo sin fin y cremallera, ese sistema permite generar un empuje en uno de los extremos de la parábola para generar el movimiento. Los motores usados en estos casos suelen ser motores de D.C. o motores de pasos.



Figura 14: Sistema de Seguimiento Solar.

Fuente: Cortesía Evolve Solar – India

Otro tipo de sistema que se tiene como actuador, es aquel cuyo movimiento se consigue en base al funcionamiento de pistones hidráulicos acoplados al sistema de seguimiento, la acción se realiza directamente sobre la bomba que mueve el fluido hidráulico, así se consigue controlar la cantidad de fluido que atraviesa hasta los pistones.



Figura 15: Sistema de Seguimiento Solar

Fuente: Cortesía PANASONIC

2.3.4 SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DEL SEGUIDOR.-

Una vez que se ha realizado una revisión general del estado del Arte de los sistemas fototérmicos de concentración y las diferentes partes que lo componen, se ha querido desarrollar un sistema que sea confiable, simple, de fácil comprensión y modificación, con objeto de cambiar, modificar o intervenir sobre las variables a ser controladas, por lo tanto, se ha realizado un escogimiento de las siguientes partes de los subsistemas que intervienen en el sistema general.

2.3.4.1 Subsistema Sensor.-

Como se determinó anteriormente, existen 2 tipos de seguimiento del sol, el uno óptico, basado en sensores que determinan un seguimiento del sol, sin embargo, este sistema se descartó debido a la gran presencia de nubosidad en el ambiente durante todas las épocas del año, como se demuestra en el siguiente análisis.

En la Sierra del Ecuador, específicamente en la zona central de la Provincia de Pichincha se observa la presencia de un alto índice de nubosidad total, la cual según el INAMHI se define como, “La fracción de la bóveda celeste cubierta por la totalidad de nubes visibles. Se divide a la bóveda celeste en octavos de cielo cubierto, llamados octas, que es la unidad de medida de la nubosidad, este parámetro lo estima el observador por observación directa y no utiliza aparatos para su estimación” y se obtiene un valor promedio en base a tres observaciones que son a las 7, 13 y 19 horas, su media mensual se calcula con un mínimo de 20 datos medios diarios (INAMHI, 2014, págs. 7,8), Los valores de la nubosidad para los años 2011 y 2012 se presentan en el ANEXO, donde se observa el valor mensual de la nubosidad y que el valor promedio Anual en varias estaciones de la Provincia de Pichincha es 6, esto comparativamente con el valor máximo de la nubosidad que es 8, se determina que existe una gran nubosidad en el sector.

Por lo tanto, se ha optado por el sistema que depende del comportamiento regular del sol siguiendo una trayectoria definida sobre la tierra, y en este caso sobre la ESPE, de tal manera que, esta información se introducirá en un proceso de cálculo de la posición del sol en función del día.

2.3.4.2 Subsistema de Control.-

Se ha considerado la utilización de medios electrónicos para el sistema de control, debido a su bajo costo, alta confiabilidad, fácil construcción y armado.

El elemento principal de este sistema de control se ha considerado sea un PLC o Control Lógico Programable, porque permite acoplarse adecuadamente a esta clase de sistemas por su versatilidad y fácil programación, así como la amigabilidad que tienen con los usuarios para presentar los diferentes elementos y señales de control.

La información provista por el subsistema sensor ingresará a este sistema basado en PLC, el cual procesará la información y realizará acciones sobre el elemento actuador.

2.3.4.3 El subsistema de Actuación.-

Dentro de los sistemas de actuación vistos en el estado del arte, de los cuales, principalmente existen 3 que son: Los sistemas de cremallera y motoreductor, motoreductor acoplado al eje e hidráulicos, se ha escogido el segundo debido a la facilidad de la adquisición local y que no se requiere mandar a fabricar un sistema de cremallera mecánica para el sistema seguidor con la precisión que esta demanda, por lo tanto se ha escogido un sistema de motor y reductores mecánicos acoplados en varias etapas existentes en el mercado, que permiten conseguir la lentitud deseada en el proceso de giro. Para tener un margen de variabilidad controlada sobre el sistema del motor, se ha considerado la utilización de un variador de velocidad, el cual permite de una manera electrónica controlar la velocidad del motor.

CAPÍTULO 3

DISEÑO DEL SISTEMA DE SEGUIMIENTO SOLAR

Considerando los métodos explicados en el estado del arte, y en la selección de las alternativas del seguidor, se ha escogido utilizar el método del seguimiento solar basado en las coordenadas de posición del sol, durante su movimiento aparente de Este a Oeste, producido por la rotación de la tierra.

3.1 DETERMINACIÓN DE LA POSICIÓN SOLAR LOCAL

3.1.1. COORDENADAS HORARIAS

Según (Jutglar, 2004, pág. 13), El siguiente método de Coordenadas horarias, indica la posición del sol respecto de un punto situado sobre la superficie terrestre, ésta se determina mediante la utilización de 3 ángulos que se observan en la Figura 17.

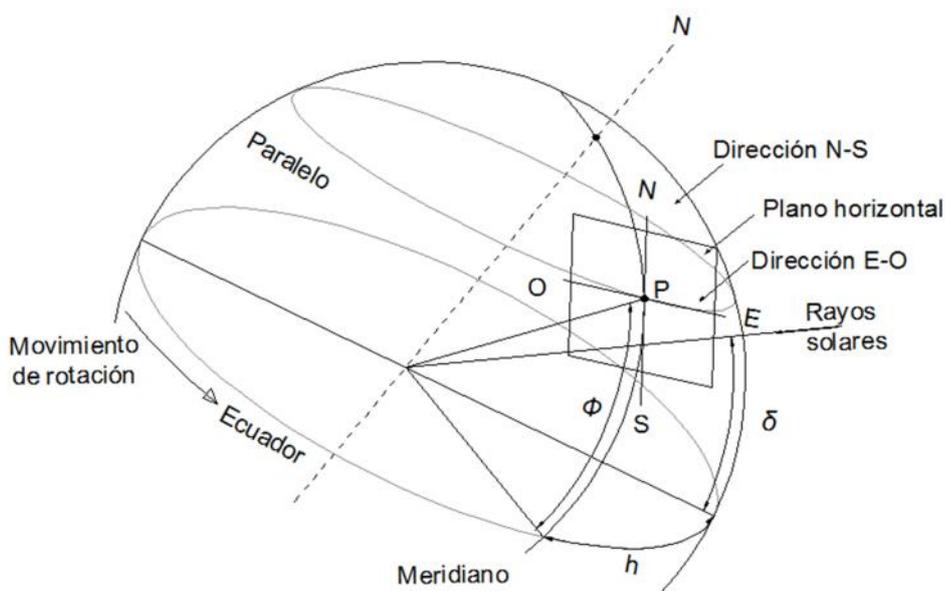


Figura 17: Latitud dada por el ángulo \varnothing° y el ángulo horario h° dado para un punto P situado sobre la superficie de la Tierra.

Fuente: (Jutglar, 2004, pág. 13)

Declinación: ($^{\circ}$) ángulo que forma el plano de la línea equinoccial con el plano de la órbita de la tierra.

Latitud: (\varnothing°) Es el ángulo comprendido entre el punto P sobre la superficie terrestre que está sobre la circunferencia del plano paralelo a la línea equinoccial (ej.: Trópico de Cáncer) y el plano de la línea equinoccial, se tomará como positivo para el hemisferio norte y negativo para el sur.

Angulo Horario (h): depende de la hora del día, es el ángulo comprendido entre el plano del meridiano que pasa por el punto P y el plano meridiano que está orientado directamente al sol, por lo tanto, cuando este ángulo sea 0° , el plano meridiano del punto P estará orientado directamente al sol, y éste se encontrará en el punto más alto de su trayectoria, marcando el medio día solar.

El tiempo solar verdadero (TSV), es el tiempo que marca la posición del sol sobre una longitud determinada. Este es el tiempo que tarda el sol en pasar dos veces seguidas por el mismo meridiano terrestre.

Como la tierra gira una vuelta completa en un día solar, es decir 360° , y que un día solar completo tiene 24 horas, entonces, el ángulo horario h expresado en grados estará dado por la expresión:

$$h = \frac{15^{\circ}}{1\text{hora}} \times (TSV - 12)\text{horas} \quad (3.1)$$

Por otro lado se debe considerar que la velocidad de rotación de la tierra no es constante durante el año, esto hace que también varíe la duración del día solar, por lo tanto, un reloj convencional no puede medir la duración del día solar, ya que éste no dura exactamente 24 horas, entonces se considera el TSM o tiempo solar medio, que considera que la tierra es esférica y se

mueve a una velocidad de rotación constante, la diferencia entre el TSV y el TSM, se denomina ecuación del tiempo (*ET*).

$$ET = TSV - TSM \quad (3.2)$$

La *ET*, se calcula con una expresión aproximada, propuesta por WHILLIER y es:

$$ET = 9,87 \sin 2B - 7,53 \cos B - 1,5 \sin B \quad (3.3)$$

Donde *ET* es la ecuación de tiempo en minutos

$$B = \frac{360}{364} (z - 81) \quad (3.4)$$

B está en grados sexagesimales y *z* es el número de día del año (para el 1 de enero $z=1$ y para 31 de diciembre $z=365$)

Sin embargo para fines prácticos, se tiene la tabla que da los valores medios de la *ET* en función del mes, según se observa en la tabla 4. Este incremento o decremento viene dado en minutos. (Jutglar, 2004, págs. 15,16)

Tabla 4:

Valores medios de la ecuación del tiempo (en minutos)

Valor medio	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
1 decena del mes	-5	-14	-12	-3	3	2	-4	-6	1	11	16	10
2 decena del mes	-9	-14	-9	0	4	0	-6	-4	5	14	15	5
3 decena del mes	-12	-13	-6	2	3	-2	-6	-2	8	16	13	0
Promedio Mensual	-10	-14	-9	-1	3	0	-5	-4	5	14	15	5

Fuente: (Jutglar, 2004, pág. 15)

Por otro lado, el tiempo solar medio o tiempo civil TC se encuentra asociado a un meridiano que pasa por un punto dado. Como ejemplo tenemos, para el meridiano de Greenwich, el cual se conoce como tiempo

universal, cuando son las 12 del día, coincide que el sol se encuentra alineado a este meridiano.

A la tierra se la ha dividido en 24 husos horarios o 24 meridianos y que corresponden a las 24 horas diarias que se demora en dar la tierra una vuelta completa, o girar 360 grados. El ángulo entre 2 husos horarios es 15° ($15 \times 24 = 360^\circ$) y cada huso horario y su meridiano correspondiente, tienen su propio TC (tiempo civil).

El huso horario abarca una zona $7,5^\circ$ hacia el este y $7,5^\circ$ hacia el oeste, si se incrementa sobre cualquiera de estos 2 valores se cambia de huso.

Por razones prácticas cada país se acoge al huso horario que mejor se acomoda de acuerdo a su posición geográfica, normalmente éste se implanta para todo el territorio de un país, si éste es muy grande, puede tener varios husos horarios.

Debido a que el TSV depende de la longitud concreta de la posición del sol sobre un punto y el TC se adapta al huso horario que tenga un país, debe tenerse en cuenta la diferencia de longitud entre el meridiano de referencia y el que pasa por el punto considerado, lo que determina una diferencia de tiempo entre el TSV y el TC.

Por otro lado, la Hora Oficial (*HO*) de un país no siempre coincide con la hora civil que éste tendría por estar ubicado en una zona determinada, en muchos casos debido a motivos de ahorro energético.

Por lo tanto:

$$TSV = HO - e + ET + \frac{\lambda m - \lambda}{15} \quad (3.5)$$

Donde:

HO = hora oficial

e = adelanto respecto de la hora civil

ET = ecuación del tiempo que depende la época del año

m = longitud del meridiano medio del huso horario adoptado

= longitud del meridiano sobre el punto estudiado

3.1.2 COORDENADAS ANGULARES

Otra forma de determinar la posición del sol, según (Jutglar, 2004) es mediante coordenadas angulares, el sol dibuja trayectorias diferentes según la estación del año. Si una persona se sitúa en el hemisferio Norte, por ejemplo, Nueva York, observará que aparentemente desde el horizonte, en invierno, el sol sube poco y en el verano se encuentra mucho más arriba. En el Ecuador a las 12H00 PM, por ejemplo, se observa que en el solsticio de verano, el sol se encuentra ubicado a 23° y 27 min respecto de la vertical en el hemisferio Norte, y en el solsticio de invierno, el sol se encuentra ubicado a 23° y 27 minutos respecto de la vertical en el hemisferio Sur (pag.16).

Con estas consideraciones, para conocer el movimiento del sol se utilizará un sistema de coordenadas con 2 ángulos, que permiten saber dónde se encuentra el sol cada momento.

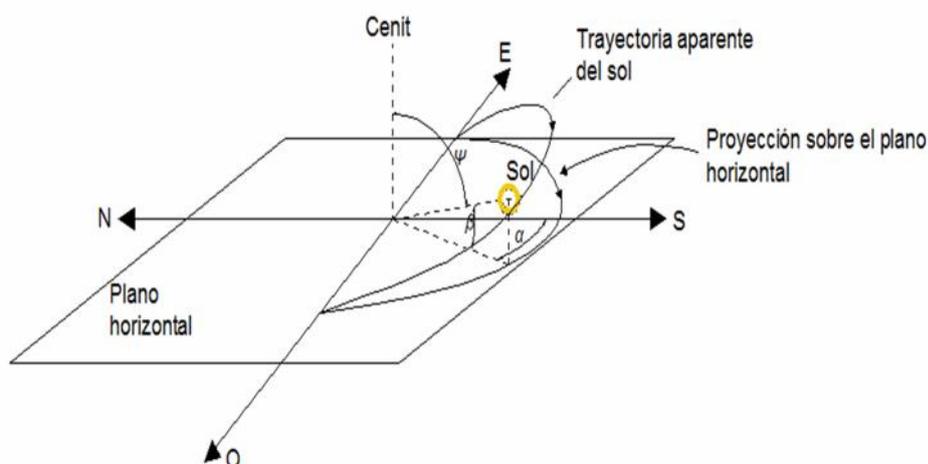


FIGURA 18. Posición del sol respecto de una superficie horizontal

Fuente: (Orbea E. & Silva J., 2014, pág. 19)

Azimut solar (Ψ).- Es el ángulo horizontal formado por la posición del sol y el verdadero sur.

Altura solar (β).- Es el ángulo comprendido entre la posición aparente del sol en el cielo con el horizonte del lugar.

Angulo Cenital (α).- es el ángulo complementario a β y es el ángulo entre la posición del sol y la perpendicular en el punto considerado. La figura 18 muestra los ángulos señalados.

Las coordenadas angulares se relacionan según las siguientes expresiones

$$\cos \Psi = \sin \beta = \sin \varnothing \sin \bar{d} + \cos \varnothing \cos \bar{d} \cos h \quad (3.6)$$

donde $h =$ ángulo horario expresado en grados

$$\sin \alpha = \frac{\cos \bar{d} \sin h}{\cos \beta} \quad (3.7)$$

Entonces, para un punto, en un día determinado, (se conoce la latitud \varnothing y la declinación \bar{d}), podría calcularse la hora de la puesta del sol, ya que sería 0, Por lo tanto, podría calcularse el ángulo horario de puesta de sol su azimut con las siguientes ecuaciones:

$$\cos h = -\operatorname{tg} \varnothing \operatorname{tg} \bar{d} \quad (3.8)$$

$$\sin \alpha = \cos \bar{d} \sin h \quad (3.9)$$

En consecuencia a partir de la ecuación siguiente podría calcularse la duración del día.

$$Td = \frac{2}{15} \operatorname{arccos}(-\operatorname{tg} \varnothing \operatorname{tg} \bar{d}) \quad (3.10)$$

Estas ecuaciones descritas son aplicables para latitudes superiores a la del trópico (Jutglar, 2004, pág. 17)

Por ejemplo en el caso del Ecuador y en especial de la ESPE como la latitud es prácticamente 0 aplicando la ecuación (3.6) se tiene

$$\sin \beta = \cos \delta \cosh \quad (3.11)$$

Lo cual indica que para el caso de la ESPE, los ángulos que influyen en la trayectoria del sol sobre el cielo, son la declinación y el ángulo horario.

3.1.3 DETERMINACIÓN DE LA POSICIÓN SOLAR LOCAL EN EL ÁREA DE ESTUDIO

El Ecuador se acoge a 2 husos horarios, los mismos que corresponden a la diferencia horaria respecto del meridiano de Greenwich, el primero está sobre el territorio continental y es GMT – 5 horas (hora de Greenwich menos 5 horas) y el segundo pasa por las Islas Galápagos y es GMT - 6 horas.

Sin embargo, aunque el país tiene un Tiempo Civil (TC), un punto determinado dentro del territorio tiene un Tiempo Solar Verdadero (TSV) y que depende de su longitud concreta respecto del meridiano de referencia o al de Greenwich.

Por lo tanto para el territorio continental del Ecuador y por estar ubicado sobre la línea ecuatorial, por ejemplo para el mes de Noviembre si la Hora Oficial es HO =12 horas, el TSV de la ESPE será:

$$TSV = 12 + 0 + 0,25 \text{ horas} + \frac{75 - 78^{\circ} 26' 47''}{15^{\circ}}$$

$$TSV = 12 \text{ horas} + 0,25 \text{ horas} - 0,229759 \text{ horas}$$

$$TSV = 12 \text{ horas } 2 \text{ min y } 47 \text{ seg}$$

Esta será la hora de la ESPE del Tiempo Solar Verdadero o TSV para el mes de Noviembre cuando sea las 12H00 pm, del tiempo civil del Ecuador, como se observa hay un adelanto de 2' y 47" respecto de la HC.

ET = se asume según la Tabla 2 para el mes de Noviembre, cuyo tiempo promedio del mes = 15 min = 0,25 horas

m = longitud del meridiano medio del huso horario adoptado = 75° , se observa en la Figura 19 el Plano del Ecuador con el meridiano mencionado.

= longitud del meridiano sobre el punto estudiado. Según la Figura 19 la ubicación de la ESPE se encuentra entre el meridiano 78° y 79° . Para usar coordenadas exactas, GOOGLE MAPS determina que éstas respecto del meridiano de Greenwich son: ($0^\circ 18' 48,5''$ S; $78^\circ 26' 47''$ W).

En la figura 19 se observa el plano del Ecuador y la ubicación del Meridiano 75° que marca la *HC* del Ecuador continental.

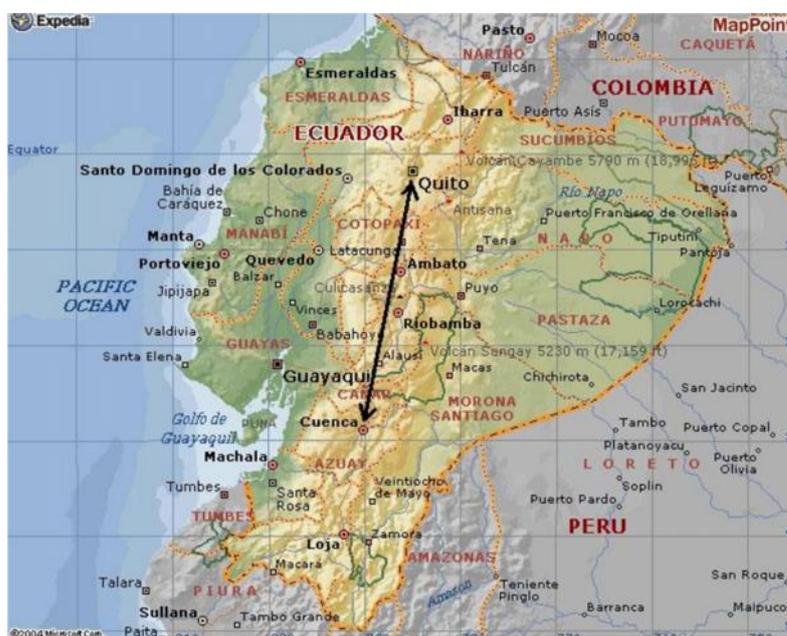


Figura 19: Mapa del Ecuador

Fuente: <https://alicantevivotest.files.wordpress.com/2009/11/jorgejuanmapaecua.jpg>

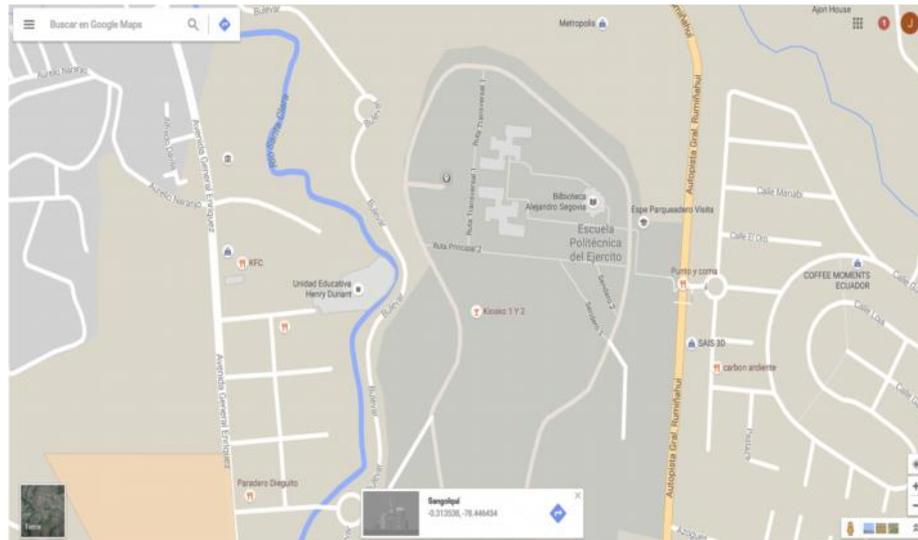


Figura 20. Plano ESPE en Google Maps con las coordenadas de ubicación Sistema de Concentración Cilíndrico Parabólico.

Fuente: (Referencia GOOGLE MAPS -0.313538 -78.446454)

3.2 INCIDENCIA DE LA POSICIÓN DEL SOL SOBRE UN SISTEMA CILINDRO PARABÓLICO

Un sistema cilindro-parabólico se constituye en un reflector semicilíndrico y de perfil parabólico, donde, la radiación solar se mantiene concentrada a todo lo largo del foco de la parábola, posee un sistema de seguimiento solar en un solo eje basado en un sistema de control que orienta el reflector cilindro-parabólico en la trayectoria solar durante el día, el eje de estos sistemas se orienta siempre en dirección Norte Sur.

En el caso del Ecuador, al estar ubicado en el paralelo denominado línea equinoccial, debido a la traslación de la tierra como se vio en la FIGURA 4., y por la declinación que es el ángulo que forma el plano del ecuador con la dirección en la que se encuentra el sol durante el transcurso del año, se observa que, si se considera un plano tangente a la superficie de la tierra ubicado en la ESPE, un observador durante el transcurso del año, mirará que el sol se traslada desde una ubicación al norte formando un ángulo máximo con el plano de la línea equinoccial, y sucede cuando es el solsticio de verano con 23 grados y 27 min, se traslada durante 6 meses, hasta la

posición sur formando un ángulo máximo con el plano de la línea equinoccial, y sucede cuando es el solsticio de invierno de 23 grados y 27 min. Para regresar al norte nuevamente sobre los 6 meses restantes, este hecho se puede visualizar en la figura 21.

Este movimiento de traslación del sol durante el año determina que la radiación solar variará desde un mínimo cuando se encuentra sobre los solsticios a un máximo cuando se producen los equinoccios.

Este análisis, aplicado a los sistemas cilindro-parabólicos determina que la orientación del eje será de Norte a Sur, y que el proceso de seguimiento solar ocurrirá cuando el sol se traslada de Este a Oeste, sin considerar la influencia del ángulo de declinación del sol.

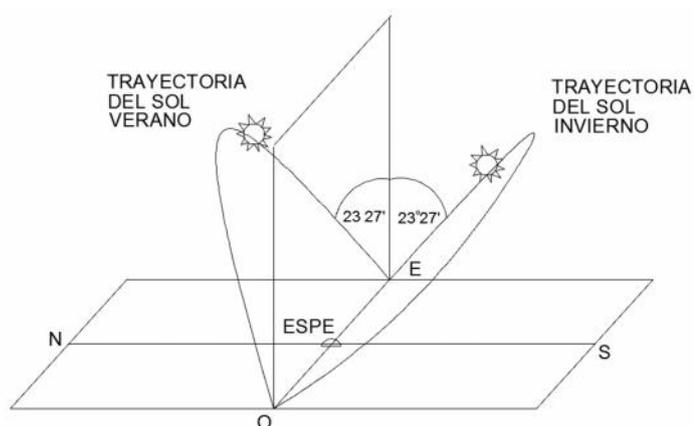


Figura 21: Declinación del sol entre invierno y verano para la ESPE

Con la consideración anterior, para los sistemas en un solo eje, entonces es determinante encontrar la ubicación del sol en el transcurso del día o su **TSV**. Sin embargo como se puede observar, las 12H00 del **TSV** sucede siempre que el Sol se encuentre en la cúspide de la trayectoria que dibuja de este a oeste, cualquiera sea el ángulo de declinación durante el año. Este hecho se puede visualizar en la figura 22.

Por otro lado, se debe considerar que en la trayectoria que describe el sol en el firmamento, éste no es un foco rigurosamente puntual. Desde la Tierra se ve el diámetro aparente del sol bajo un ángulo de $0,53^\circ$. (Jutglar, 2004, pág. 9) . O su equivalente a 9,25 mrad. Si el movimiento del sol se sabe que

en 1 hora el sol se traslada un ángulo de 15° , este ángulo de $0,53^\circ$ equivale a 2 minutos y 7,2 seg.

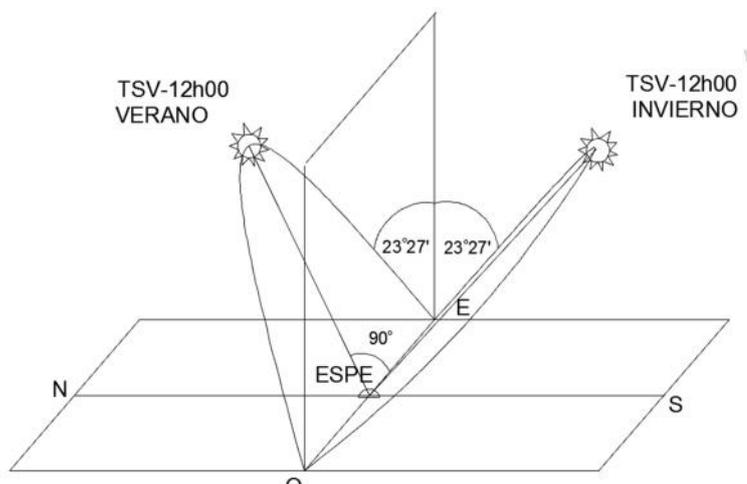


Figura 22: Ubicación del sol a las 12h00 del Tiempo Solar Verdadero TSV

3.3 DESARROLLO DEL PROTOTIPO

3.3.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA CILINDRO PARABÓLICO CONSTRUIDO.

El sistema cilíndrico parabólico construido responde a un Megaproyecto planificado por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, en el cual se consideró desarrollar la **INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE APLICACIONES DE LA ENERGÍA SOLAR TÉRMICA DE MEDIA Y ALTA TEMPERATURA PARA TRIGENERACIÓN (TRABAJO, FRÍO, CALOR) UTILIZANDO SISTEMAS DE CONCENTRACIÓN**, por lo tanto, se realizó la construcción de un equipo cilindro- parabólico de media temperatura, cuyo fluido térmico puede ser utilizado en múltiples aplicaciones una vez que ha absorbido el calor solar, de igual forma se ha construido otros equipos que serán utilizados en otras tesis.

El sistema construido e instalado, consiste en un sistema conformado por 6 cuerpos cilindro-parabólicos. En el foco del cuerpo reflector y a lo largo del cilindro, se encuentra instalado el sistema de absorción de calor que consiste en un tubo de vidrio externo y un tubo de hierro negro interno concéntrico, por donde circulará el fluido térmico. Este fluido está en un

circuito cerrado impulsado por una bomba hidráulica desde un tanque recolector. Las figuras 22, 23, 24 muestran el sistema instalado en la ESPE.

El eje de rotación del sistema se encuentra a 5 cm de distancia del vértice del cuerpo reflector. Este eje de rotación une los 6 cuerpos y los mantiene alineados en una misma dirección.

3.3.2 ANÁLISIS GEOMÉTRICO DEL CONCENTRADOR CILINDRO-PARABÓLICO

Los concentradores cilindro parabólicos pueden ser construidos con un reflector con geometría esférica (o habitualmente cilíndrica) como aproximación de la parábola o con geometría parabólica que es la que domina la mayoría de concentradores solares. El siguiente análisis geométrico determinará la construcción de un espejo de tipo cilíndrico o parabólico.



Figura 23: Cuerpos cilíndricos del sistema

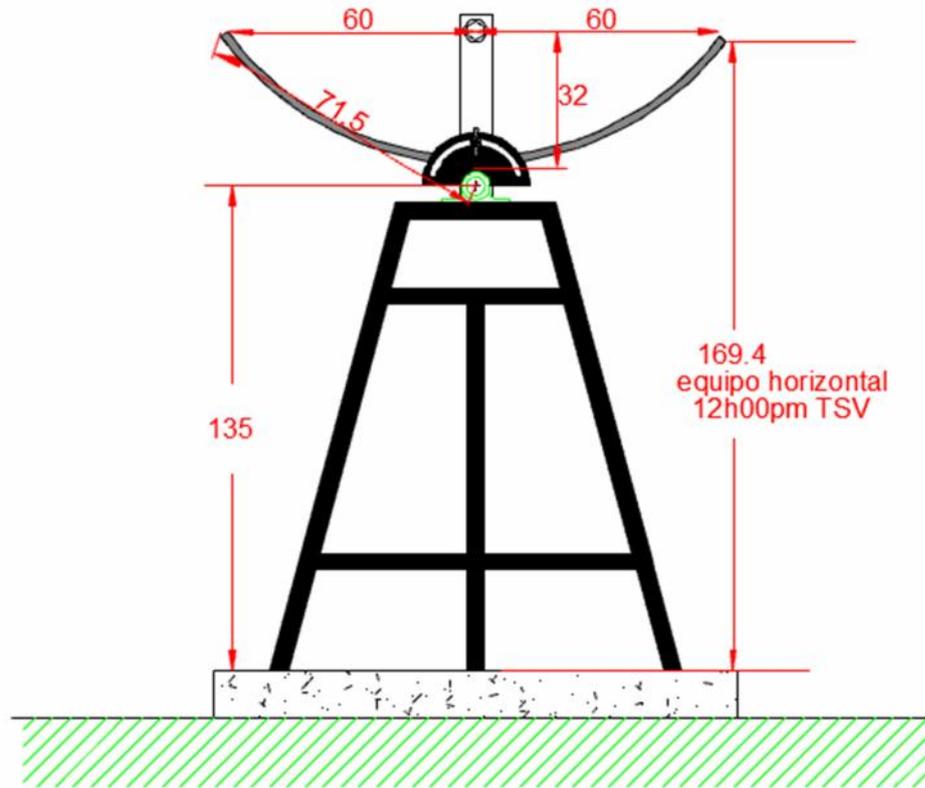


Figura 24: Vista lateral con dimensiones

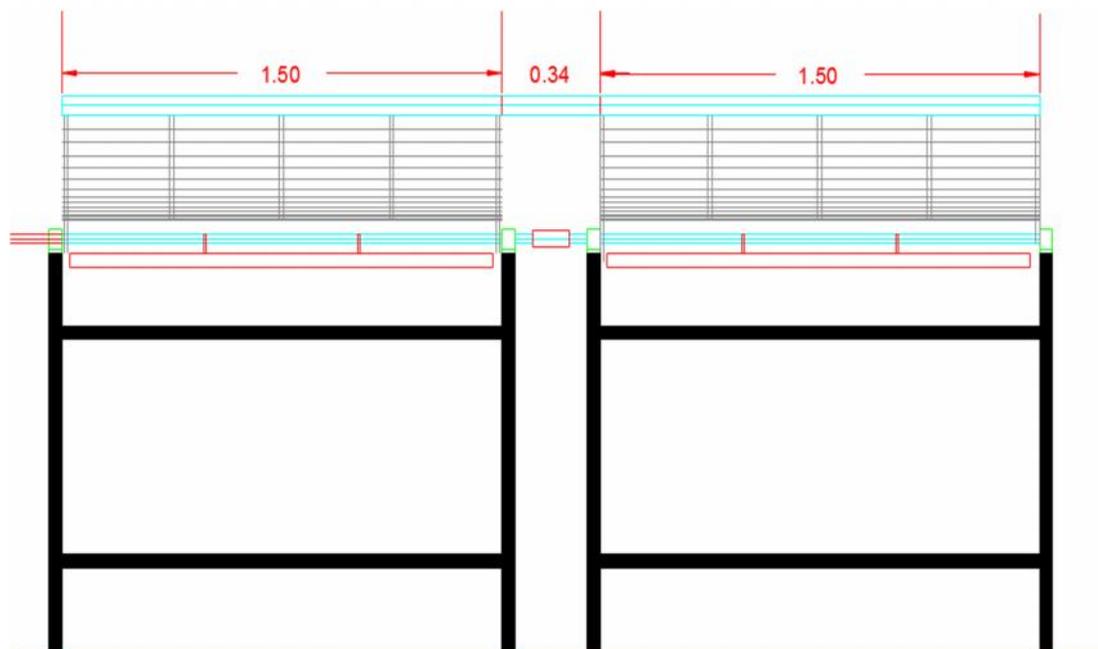


FIGURA 25: Vista frontal de 2 cuerpos con dimensiones

3.3.2.1 Óptica esférica

En el caso de ser cilíndrico, se parte del análisis de la ecuación de la circunferencia que es:

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = r^2 \quad (m^2) \quad (3.12)$$

La forma más conocida de esta ecuación es:

$$x^2 + y^2 = r^2 \quad (m^2) \quad (3.13)$$

Cuando el centro se sitúa en el punto (0,0).

En el caso de un concentrador cilíndrico o de geometría esférica, la reflexión de los rayos paralelos de luz solar pasa por una línea dibujada desde el centro del círculo y paralela a los rayos incidentes, según se observa en la figura 26.

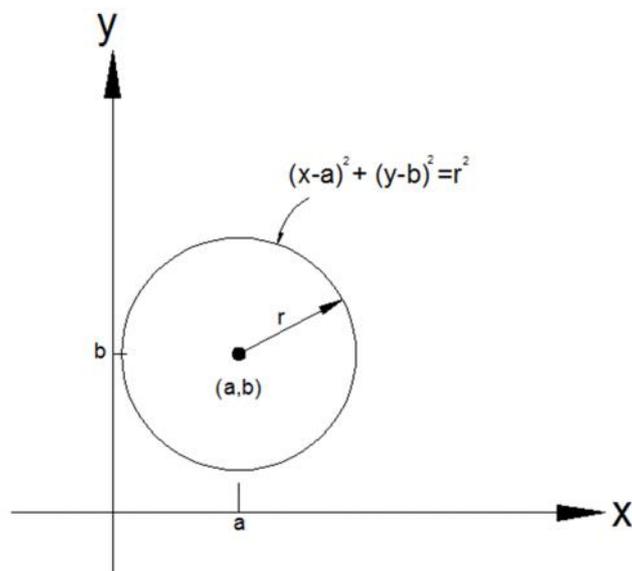


Figura 26: Lugar Geométrico correspondiente a una circunferencia.

Fuente: (Fernández Salgado, 2010)

En la figura 24, como se puede observar, el espejo circular es simétrico a rotaciones sobre su centro, esto significa que cuando los rayos del sol inciden sobre el espejo, tanto de forma perpendicular a la apertura de éste,

así como ligeramente inclinados, el patrón de rayos reflejados es muy parecido entre los dos.

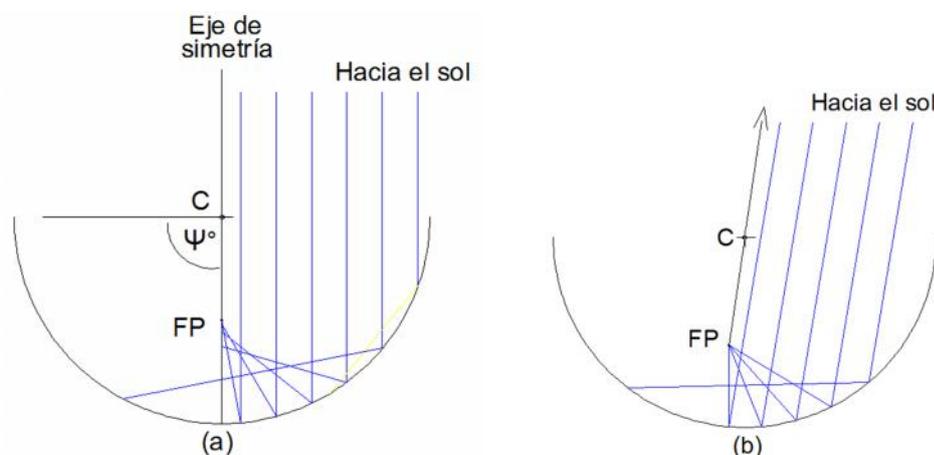


Figura 27: Características de la incidencia de los rayos solares sobre óptica esférica

Fuente: (Fernández Salgado, 2010)

El eje de simetría es la perpendicular a la apertura del espejo y que pasa por el centro de la circunferencia. El ángulo de corona (ψ°) es el ángulo que forma el eje de simetría con cualquiera de los extremos del reflector cilíndrico o parabólico. El punto FP se denomina foco paraxial y corresponde al punto donde se concentran los rayos reflejados y sucede cuando el ángulo de corona es menor a 30° . Éste punto se encuentra ubicado en la mitad del radio de la circunferencia.

Un colector cilíndrico con un amplio ángulo de corona, superior a los 30° los rayos reflejados ya no se concentran en FP sino aparece un plano focal, para evitar este foco disperso, los colectores cilíndricos deben ser diseñados con ángulos de corona pequeños para dar una línea focal aproximada. Se recomienda que éste ángulo sea máximo 30° , como se observa en la figura 27, el rayo reflejado cruza la línea bajo PF, ésta difusión de los rayos reflejados se denomina aberración esférica. (Fernández Salgado, 2010, págs. 455-459).

3.3.2.2 Óptica parabólica

Una parábola puede definirse como el lugar geométrico de aquellos puntos de un plano que equidistan, desde un punto dado llamado Foco, hasta una recta llamada directriz, esta recta es perpendicular al eje de la parábola. La figura 28 muestra el diagrama respectivo.

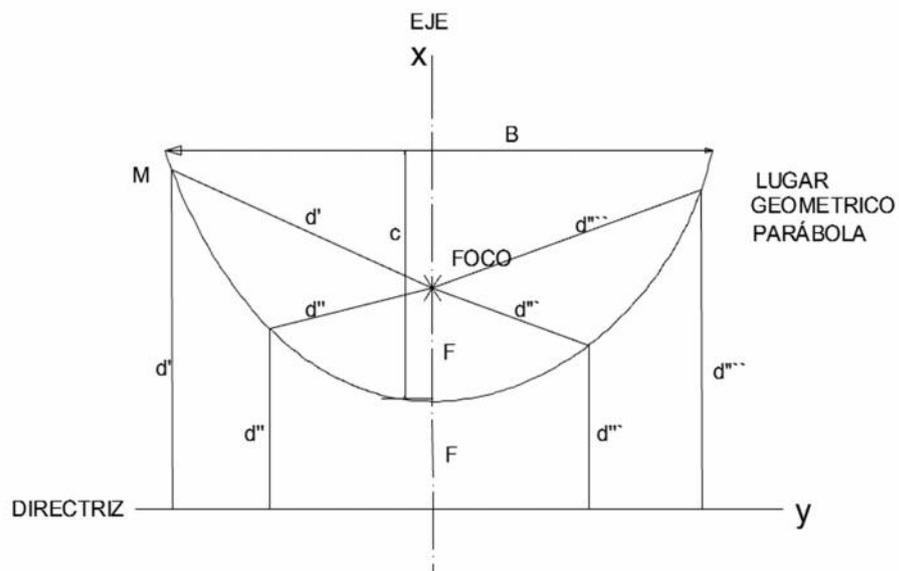


Figura 28: Parábola y sus elementos

Fuente: (Fernández Salgado, 2010)

La Ecuación que determina el lugar geométrico de los puntos de la parábola es:

$$y^2 = 4Fx \quad (3.14)$$

En un espejo parabólico, cuando los rayos solares son paralelos al eje de simetría, los rayos reflejados intersecan en un punto llamado Foco. Si los rayos solares incidentes no son paralelos al eje de simetría aunque sea ligeramente, los rayos se dispersan y se tiene una difusión de la imagen en el punto focal, por lo tanto, en el proceso de seguimiento del sol, el espejo parabólico debe seguir exactamente el movimiento del mismo. (Fernández Salgado, 2010, pág. 456).

3.3.2.3 Análisis y Desarrollo de Relaciones Matemáticas

a) Análisis Geométrico del Reflector construido como un reflector cilíndrico.

El perfil de reflector será cilíndrico si cumple con el lugar geométrico de un arco de circunferencia, para este análisis se parte de puntos y medidas referenciales tomadas las cuales se observan en la figura 29.

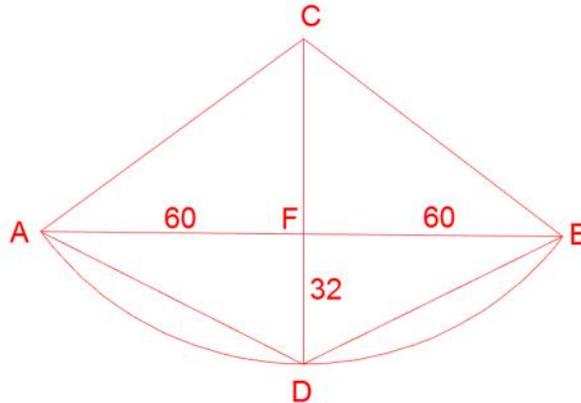


FIGURA 29: Perfil teórico con medidas referenciales

En el triángulo AFD el segmento AD será:

$$AD^2 = AF^2 + FD^2$$

$$AD^2 = 60^2 + 32^2$$

$$AD = 68 \text{ cm}$$

$$\sin ADF = \frac{AF}{AD}$$

$$\sin ADF = \frac{60}{68}$$

$$\angle ADF = 61,92^\circ$$

El triángulo ACD será isósceles por lo tanto:

$$\angle ADC = \angle DAC = 61,92^\circ$$

Y el punto M será el punto medio del segmento AD y a su vez CM será la altura

$$\cos MDC = \frac{34}{CD}$$

$$CD = \frac{34}{\cos 61,92}$$

$CD = R = 72,2 \text{ cm}$ que es el radio de la circunferencia.

Por lo tanto cualquier punto perteneciente al arco ADB es parte del lugar geométrico que cumple con la circunferencia cuyo radio es 72cm.

b) Análisis Geométrico del Reflector construido como un reflector parabólico.

El perfil de reflector será parabólico si cumple con el lugar geométrico de la parábola, para este análisis se parte de puntos y medidas referenciales tomadas las cuales se observan en la figura 29.

La ecuación que debe cumplir es la 3.14 entonces:

$$y^2 = 4 \times 32x$$

$$\text{Si } x = 32 \text{ cm}$$

$$y^2 = 4 \times 32 (32)$$

$$y = 64 \text{ cm}$$

Es decir que para el punto $x = 32 \text{ cm}$ la parábola teórica debe tener una apertura de 64 cm respecto del eje.

c) Análisis comparativo del reflector construido con un reflector teórico.

Para realizar un análisis de la geometría del espejo del prototipo construido e instalado en la ESPE. La figura 30 demuestra las medidas tomadas en el colector cilindro-parabólico, un análisis comparativo entre la figura con medidas reales con una figura cilíndrica teórica y parabólica teórica, demuestra que no es un reflector parabólico debido a que para un punto $x = 32 \text{ cm}$ la distancia real es: $y = 60 \text{ cm}$ y la teórica indica que $y = 64 \text{ cm}$, por lo tanto no es un reflector parabólico.

Por otro lado, se demuestra que por las medidas tomadas en el elemento construido, coincide con un reflector de tipo cilíndrico o de geometría esférica, siendo el radio del espejo 0,72m.

El foco paraxial entonces se encontrará ubicado a 36 cm de la base del colector, y los rayos que inciden sobre el espejo, al ser reflejados forman un plano focal ya que el ángulo de corona supera los 30° .

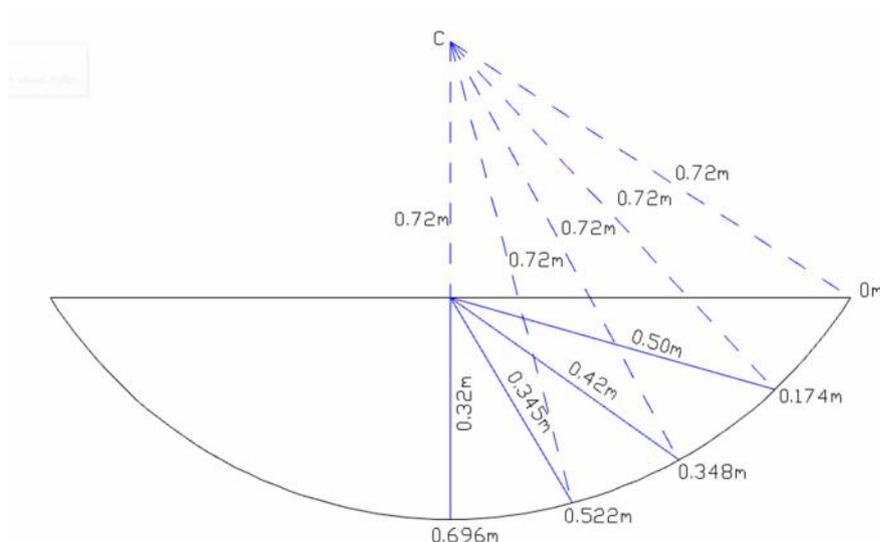


Figura 30: Mediciones tomadas del Reflector Cilindro Parabólico construido.

3.3.2.4. Análisis de la Posición del Conjunto del CCP.

Todo el sistema y por lo tanto el eje y foco del sistema cilindro-parabólico ha sido orientados en dirección Norte – Sur, esto permitirá que el movimiento de la parábola sea desde Este a Oeste, siguiendo la trayectoria solar durante el día, sin importar el movimiento de Nutación de la Tierra (Traslado del Sol de Norte a Sur y viceversa durante los solsticios).

a) *Determinación de la Posición 12h00 PM y de arranque HOME del sistema.*

El TSV correspondiente a las 12h00 PM coincide con la ubicación del sol perpendicular a una línea orientada Norte Sur sobre un punto dado, para

este punto serán las 12h00PM, entonces, es necesario determinar la perpendicularidad del espejo cilindro-parabólico con la posición del sol para determinar el TSV de la ESPE en esta hora.

Orientar el espejo y alinearlos con la posición del sol a las 12h00PM, implica que la línea imaginaria que une los dos extremos del espejo esté totalmente horizontal, con este criterio, se ha realizado el siguiente procedimiento:

- a) Se procedió a verificar si el piso sobre el cual se asienta todo el sistema estaba nivelado y horizontal respecto de un eje este-oeste
- b) Se verificó que las distancias desde el eje a cada extremo del espejo sean las mismas, se encontró que esta distancia era 71.5 cm para los dos. Según se observa en la figura 30.
- c) Mediante un nivel se colocó de manera muy aproximada en la posición horizontal al espejo.
- d) Desde cada uno de los extremos del reflector se midió hacia el piso en forma perpendicular, cuando las medidas de los dos extremos fueron las mismas e igual a 169,4 cm. Entonces el eje de simetría del reflector cilindro-parabólico está alineado con el plano del meridiano que corresponden a la posición 12h00PM del TSV en la ESPE.

Una vez que se determinó la posición del sistema para cuando sea las 12h00PM se procedió a instalar un sensor alineado con esta posición, a este sensor se denominó sensor de HOME. Su ubicación se observa en la figura 31.

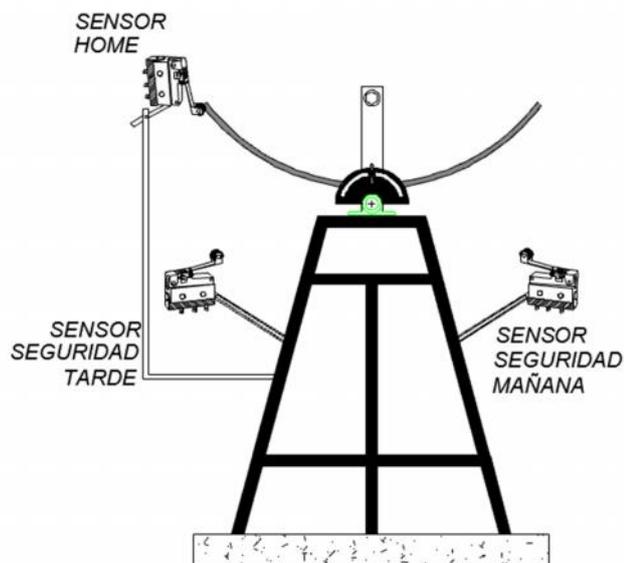


Figura 31. Ubicación de Sensores sobre el Reflector Cilindro Parabólico

3.3.2.5. Análisis comparativo de la tolerancia de tiempo entre el Seguidor solar y el movimiento del sol para la máxima incidencia permisible de los rayos sobre el sistema absorbedor.

Es importante determinar la tolerancia del sistema frente al seguimiento solar. Por lo tanto, se va a realizar el análisis de la incidencia de un rayo perpendicular al espejo y alineado con el eje de simetría considerando que este tiene un rayo reflejado al centro del tubo donde se ubica F (o foco paraxial), y la comparación con la incidencia de un rayo inclinado, paralelo a un nuevo eje de simetría que pasa por un nuevo foco F' que coincida en extremo, con la circunferencia del tubo absorbedor, y que será donde el nuevo rayo reflejado incida.

Es así que el ángulo encontrado entre los dos rayos reflejados, también será el ángulo entre los dos rayos incidentes (perpendicular e inclinado), y por lo tanto, determinará la máxima desviación, cuando el sistema no esté alineado con el sol.

La incidencia de los rayos solares se consideran que son paralelos sobre el espejo reflector, como se determinó, este espejo cumple con las

características de ser cilíndrico, así los rayos incidentes se asume que se concentran en el Foco Paraxial, siempre que el ángulo de corona sea menor a 30° , si se supera esta condición, los rayos reflejados inciden sobre un plano focal, entonces, esa será la peor condición.

Por otro lado, el foco al ser un elemento real, tiene una dimensión en el corte transversal, el diámetro del tubo absorbedor es 25 mm (1 pulgada), o un radio de 0,13mm, (no se considera el diámetro del tubo de vidrio).

La figura 32 muestra los rayos incidentes y reflejados sobre el tubo absorbedor para un ángulo de corona de 30° sobre el espejo real

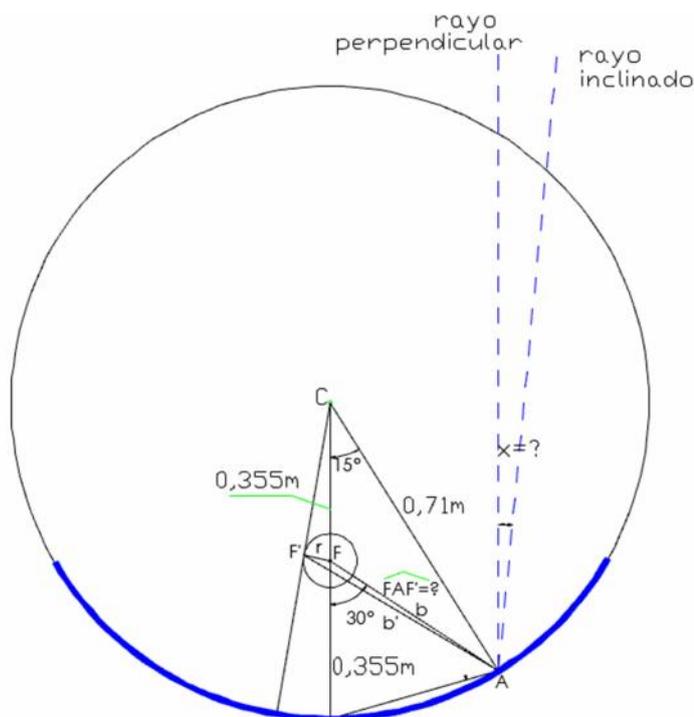


Figura 32: Rayos incidentes y reflejados sobre el tubo absorbedor para un ángulo de corona de 30° sobre el espejo real

Se va a proceder a calcular la distancia CF que es tangente al tubo absorbedor y por lo tanto forma un ángulo de 90° con el radio.

Aplicando el teorema de Pitágoras se tiene:

$$CF^2 = CF^2 - r^2 \quad (3.15)$$

$$CF = 0,3547$$

$$\cos F'CA = \frac{0,3547}{0,355}$$

De donde

$$F'CA = 2,09^\circ$$

En el Triángulo CFA aplicando la Ley de Cosenos

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos C \quad (3.16)$$

$$b^2 = CF^2 + R^2 - 2CF \times R \cos 15^\circ$$

$$b^2 = 0,355^2 + 0,71^2 - 2(0,355)(0,71) \cos 15$$

$$\mathbf{b = 0,3784m}$$

En el triángulo CF'A aplicando la ley de Cosenos

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos C$$

$$b'^2 = CF'^2 + R^2 - 2CF' \times R \cos F'CA$$

$$b'^2 = 0,3547^2 + 0,71^2 - 2(0,3547)(0,71) \cos(2,09 + 15)^\circ$$

$$\mathbf{b = 0,3852m}$$

Aplicando la ley de cosenos para el triángulo F'FA

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos C$$

$$r^2 = b'^2 + b^2 - 2b'b \cos FAF'$$

$$0,013^2 = 0,3784^2 + 0,3852^2 - 2(0,3784)(0,3852) \cos FAF' \circ$$

$$\mathbf{FAF' = 2,12^\circ}$$

Entonces, el ángulo entre los 2 rayos incidentes será también 2.12° , este ángulo llevado a tiempo representa lo siguiente:

15° ----- 60min

2,12° ----- X

$$X = \frac{2,12^\circ \times 60min}{15^\circ}$$

X = 8,48 minutos

Por lo tanto, se puede considerar que el seguidor solar si estuviese exactamente alineado con el sol, los rayos serían perpendiculares, pero si existe una desviación de esta perpendicularidad, el foco paraxial se mueve hacia la circunferencia del tubo absorbedor, donde incidirá el nuevo rayo reflejado para un ángulo de corona de 30° la máxima tolerancia será que el sistema esté desplazado 8,48 minutos.

3.3.2.6. Análisis del punto de arranque y parada del sistema de seguimiento solar.

El proceso de seguimiento solar del espejo cilindro- parabólico se producirá durante el día, el aprovechamiento de la radiación incidente sobre el CCP tiene un rango de variación dependiente de la hora, para este análisis se ha escogido las mediciones realizadas en la Estación meteorológica del Oleoducto de Crudos Pesados (OCP) Ecuador S.A. ubicada en la zona de Yaruquí, del año 2013 como año representativo, (Martinez J. & Asitimbay J., 2015) (anexo III).

La figura 33 muestra: El valor promedio por hora para todo el año en color azul, en color rojo se muestra la irradiación solar para el día que tuvo la máxima irradiación solar promedio, de igual forma el color verde representa la radiación solar para el día que tuvo la mínima irradiación solar promedio.

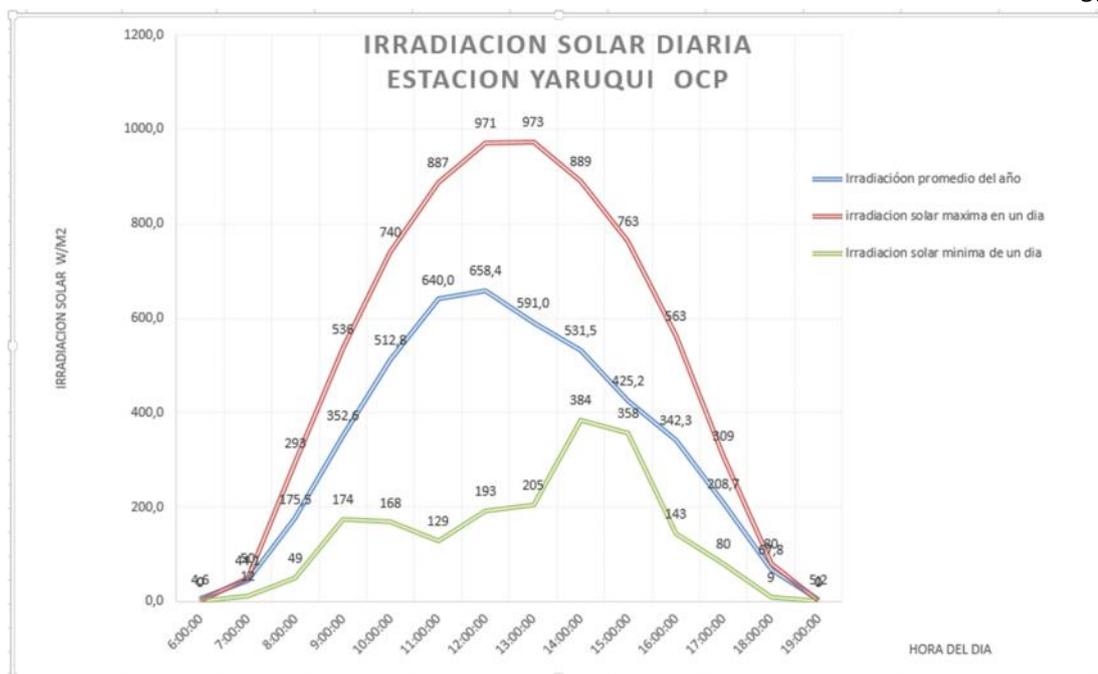


FIGURA 33: Irradiación Solar Diaria Estación Yaruqui OCP.

Según se observa para antes de las 9h00 y para después de las 16H00 se ha considerado que los valores de la radiación solar no son representativos, por lo tanto, el tiempo de seguimiento del sistema se hará desde las 9h00 AM, cuando el sol ya superó las montañas y nubosidad de la cordillera central, hasta las 4h00 PM, que corresponde a la hora donde se produce sombra sobre el sistema cilindro-parabólico por otros equipos aledaños.

3.3.3 DISEÑO MECÁNICO DEL SISTEMA DE SEGUIMIENTO

3.3.3.1 Cálculo del Sistema de acoplamiento Mecánico Motoreductor – Eje Sistemas Cilindro-Parabólico

Como compensación del torque producido por el peso del reflector parabólico, se ha colocado pesas al lado contrario del eje, así disminuye sustantivamente el torque producido por el sistema espejo y tubo absorbedor, el valor medido en el eje con un torquímetro es de $T = 20 \text{ N.m}$ máximo, dicho dato fue proporcionado el equipo construido.

Los siguientes pasos presentan los diferentes cálculos que han permitido obtener las características mecánicas a implementarse en el equipo.

Para el Cálculo de la potencia que va a mover el motor y el conjunto polea banda sobre el eje se realiza lo siguiente:

a) Cálculo de la Potencia

$$P = \frac{n \times T}{9550} [Kw] \quad ((3.17)$$

$$T = 20 \text{ N.m (medido con torquimetro en el eje de rotacion del panel)}$$

$$n = 0.000831 \text{ rpm (velocidad a la que gira el eje del panel)}$$

$$P = 1.74 \times 10^{-6} [Kw]$$

$$P = 1.296 \times 10^{-6} [Hp]$$

Se procedió con la adquisición de un motor de 1/6 Hp que es el más pequeño del mercado.

$$P = \frac{1}{6} [Hp]$$

$$P = 0.124 [Kw]$$

b) Coeficiente de corrección de potencia

El coeficiente de potencia consideras los factores mostrados en la tabla 5. La máquina conductora no es de alto torque, tiene un servicio de aproximadamente 12 horas de trabajo diarias, lo cual es considerado por la tabla un servicio normal y la maquina conducida es relativamente ligera en comparación con trituradoras y molinos. Por lo que el coeficiente de corrección de potencia recomendado por la tabla es de 1.1.

$$P_c = \frac{1}{6} \times 1.1 = 0,183 [Hp]$$

$$P_c = 0.124 \times 1.1 = 0.1364 [Kw]$$

TABLA 5
Coefficiente de corrección de la polea

Tabla - Coeficiente de corrección de la potencia						
Tipo de máquina conductora Tipo de máquina conducida	Motores de corriente alterna, torque normal, jaula de ardilla, sincrónicos, fase partida. Motores de corriente continua, bobinado Shunt. Maquinas de combustión interna, cilindros múltiples			Motores de corriente alterna, alto torque, alto deslizamiento, bobinado en serie y anillado colector. Motores de corriente continua, bobinado compound. Máquina a combustión interna, monocilíndrica. Eje en línea. arranque directo y con embrague.		
	Servicio intermedio hasta 7 horas diarias	Servicio normal 8 a 15 horas diarias	Servicio continuo más de 16 horas diarias	Servicio intermedio hasta 7 horas diarias	Servicio normal 8 a 15 horas diarias	Servicio continuo más de 16 horas diarias
Agitador para líquidos y semilíquidos, ventiladores y aspiradores, compresores y bombas centrífugas. Sopladoras hasta 10 HP. Transpostadores livianos	1.0	1.1	1.2	1.1	1.2	1.3
Trituradoras (giratorias, mandíbulas, bolas), Molinos (bolas, laminadores, barras). Calamandra para goma, bambury-extrusoras	1.3	1.4	1.5	1.5	1.6	1.8

Fuente: (DUNLOP, 2016)

c) Selección de la correa

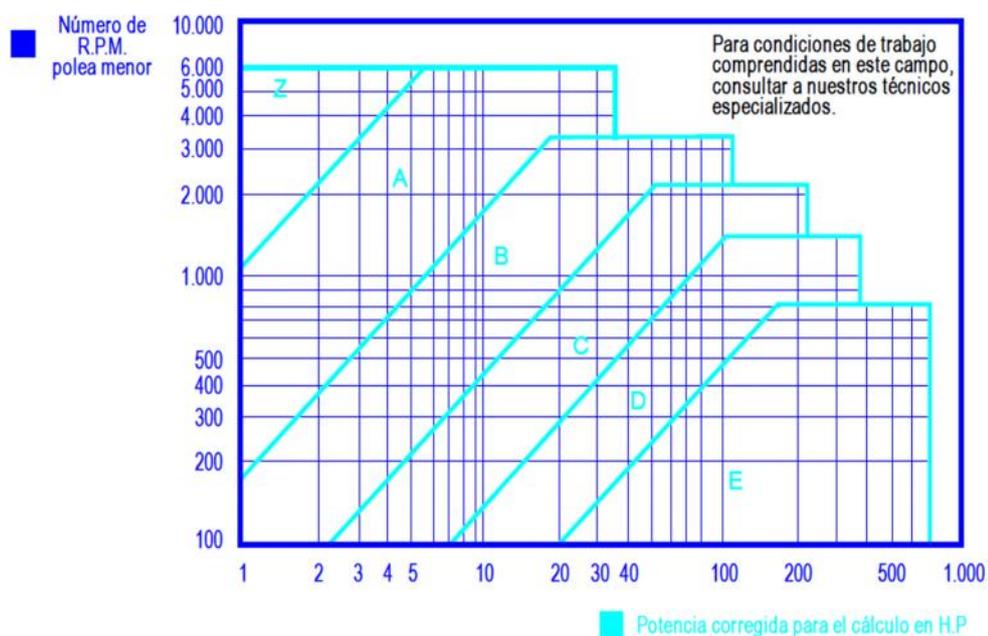


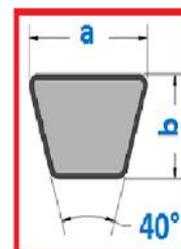
FIGURA 34: Elección de la sección de la correa

Fuente:(Catálogo Dunlop, 2016)

Tabla 6

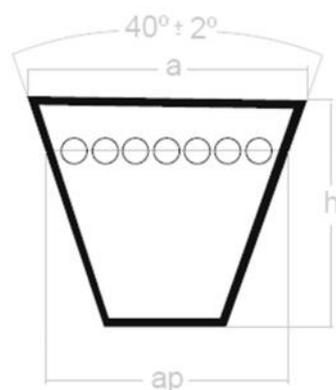
Datos para la sección de la banda

Sección de la banda	Ancho a mm	Espesor b mm	Diámetro mínimo de la polea, mm	Intervalo de potencia (kW) una o más bandas
A	12	8,5	75	0,2-7,5
B	16	11	135	0,7-18,5
C	22	13	230	11-75
D	30	19	325	37-186
E	38	25	540	75 and up



Fuente: (Naranjo Carlos _ Transmisión de potencia, 2016)

La figura 34 no especifica la sección de correa para potencias menores a 1 Hp, y para velocidades muy bajas como es el presente caso pero se ha escogido la polea de sección tipo A. Para comprobar la elección realizada, en tabla 6 se observa que la sección A es adecuada para potencias bajas, eligiéndose la de este tipo.



- a Ancho base superior.
- h Altura o espesor.
- ap Ancho primitivo.

FIGURA 35: Características de la sección de la correa

Fuente: (DUNLOP, 2016)

Tabla 7

Dimensiones sección bandas

Sección	a mm	h mm	ap mm
Z	10	6	8.5
A	13	8	11
B	17	11	14
C	22	14	19

D	32	19	27
E	38	25	32

FUENTE: (DUNLOP, 2016)

Relación de transmisión y elección de los diámetros de las poleas

La relación de transmisión es 1 por que se requiere transmitir la misma velocidad ya controlada desde el conductor al conducido.

Se eligió poleas con diámetro primitivo de 125mm el cual es especialmente recomendado para bandas de segmento A como se puede ver en la tabla 8. Además se escogió las poleas de mayor diámetro por que la banda aumente su vida útil mientras más grande sea la polea, Este diámetro equivale a poleas polea de 5 pulgadas.

Tabla 8

Diámetro primitivo de las poleas

Ø mm	Z	A	B	C	D	E
50						
53						
56						
60	●					
63	● ●					
67	●					
71	● ●	●				
75	●	●				
80	● ●	●				
90	●	● ●				
95		●				
100	● ●	● ●				
106		●				
112	●	● ●	●			
118		●	●			
125	● ●	■ ● ● ■	●			

Según normas BS3790

● Diámetro especificado

● ● Diámetro recomendado

IMPORTANTE: Al aumentar el diámetro de la polea aumenta la vida util de la correa

Fuente: (DUNLOP, 2016)

La velocidad a la que van a rotar las poleas es muy baja por lo que será suficiente seleccionar poleas de aluminio ya que su disponibilidad es mayor

en el mercado ecuatoriano que las de fundición gris y una característica valiosa es que sólo se oxida muy superficialmente, esta capa de óxido impide que el material se siga deteriorando.

Tabla 9
Velocidades máximas según material

MATERIAL		VELACIDAD
Fundición Gris	GG20	33 m/s
Fundición nodular	GGG40	41 m/s
Aluminio	A329	33 m/s
Fundición de acero	1020	45 m/s
Acero laminado	1020	61 m/s

m/s= metros por segundo

Fuente: (INTERMEC, 2016)

d) Distancia entre ejes

Cuando la distancia entre ejes se puede determinar con el siguiente criterio:

$$I \geq \frac{(K+1)d}{2} + d \quad (3.18)$$

$$K = \text{relación de transmisión} = 1$$

$$d = 125 \text{ mm}$$

$$I \geq 2 \times d$$

$$I \geq 250 \text{ mm}$$

Se eligió una distancia entre ejes de $I = 500$ para aumentar la vida útil de la banda y por facilidad en el diseño.

e) Longitud primitiva de la correa

$$L = 2I + 1,57(D + d) + \frac{(D-d)^2}{4I} \quad (3.19)$$

$$L = 2 \times 500 + 1,57 (2 \times 125) + \frac{(2 \times 125)^2}{4 \times 500}$$

$$L = 1423,75 \text{ mm}$$

Tabla 10

Longitud primitiva nominal

Longitud primitiva nominal					
Correa(in)	Sección Z (mm)	Sección A (mm)	Sección B (mm)	Sección C (mm)	Sección D (mm)
41	1166	1075	1086	-	-
42	1092	1106	1100	-	-
43	1117	1134	1140	-	-
44	1143	1153	1156	1191	-
45	1168	1186	1184	1217	-
46	1193	1199	1204	1242	-
47	1219	1232	1237	1267	-
48	1244	1262	1268	1293	-
49	1270	1280	1188	1318	-
50	1295	1306	1318	1344	-
51	1320	1330	1328	1357	-
52	1346	1254	1367	1394	-
53	1371	1381	1392	1429	-
54	1397	1405	1410	1442	-
55	1422	1429	1443	1460	-
56	1447	1459	1460	1497	-
57	1473	1492	1491	1527	-

Fuente: (DUNLOP, 2016)

3.3.3.2 Determinación de la Velocidad del Espejo Cilindro-parabólico

El movimiento del sistema debe coincidir con la velocidad que se mueve el sol en su traslación de Este a Oeste, así se conseguirá que el espejo reflector estará siempre alineado con el sol.

La velocidad de rotación en promedio de la tierra es 24 horas, esta velocidad debe coincidir con la rotación del eje del sistema entonces:

Si la velocidad de rotación de la tierra es: $V = 1\text{rev}/24 \text{ horas}$

Por lo tanto en minutos la rotación del eje será:

$$V = \frac{1\text{rev}}{24\text{h}} \times \frac{1\text{h}}{60 \text{ min}} \quad (3.20)$$

$V = 0,000694 \text{ rpm.}$ VELOCIDAD A LA QUE DEBE GIRAR EL SISTEMA DE SEGUIMIENTO

Existen varias opciones para configurar el elemento mecánico, como se mencionó en el estado del arte, existen básicamente 3 tipos de sistemas. Uno de éstos es basado en sistemas hidráulicos, un segundo corresponde a un sistema de tornillo sin fin y de cremallera acoplada a la figura del seguidor, y un tercero tipo que consiste en un motoreductor acoplado al eje.

Se descartó el sistema basado en pistones hidráulicos debido a su alto costo en el mercado. Los sistemas hidráulicos requieren acoplarse a un sistema que implica realizar un desarrollo de ingeniería mecánica con una adaptación en la estructura para que a partir de un movimiento longitudinal que tiene el pistón, convertirlo en un movimiento rotacional del espejo reflector. Por otro lado, para la adquisición del pistón se requiere ciertas características en longitud, tamaño, presión que no son comunes en el mercado local, el control se deberá hacer sobre la bomba hidráulica, esto implica el desarrollo de un proceso de control sobre el sistema de actuación más complejo debido a que existen 3 interfaces de fuerza implicadas que son: eléctrica (motor de la bomba), bomba, tanque, válvulas cierre y apertura hidráulicas, o válvula motorizada hidráulica, y conjunto mecánico que es el pistón con ejes de rotación para convertir el movimiento de longitudinal a rotacional. La ventaja de este sistema es que el acoplamiento se podría instalar en cualquier parte de tal manera que el sistema a lo largo, este más equilibrado.

La segunda opción a instalar es un sistema de motoreductor con tornillo sin fin y una cremallera instalada en la forma del espejo parabólico, así que habría que mandar a construir el sistema de engranajes conforme a cálculos de ingeniería detallados, además de desarrollar el sistema de acople motoreductor cremallera, sin embargo no se optó por esta opción ya que implicaba la dependencia de un empresa que desarrolle esta estructura por la forma y características de la cremallera y por lo tanto costosa, su ventaja

es que puede ser instalado en cualquier parte de tal manera que el sistema en su longitud estaría más equilibrado.

El tercer sistema posible a ser instalado, es el sistema basado en un motoreductor acoplado al eje, se observó que este sistema se acopla mejor a las características del sistema construido y por lo tanto menos costoso, el control es directo sobre el motor y el reductor se acopla al eje mecánicamente, se ha conseguido uno de los objetivos específicos de este trabajo que era el uso de elementos que se puedan adquirir en el mercado local, por lo tanto, estas consideraciones han llevado a escoger este sistema. La desventaja posible, es que se debe acoplar necesariamente a uno de los extremos del eje de rotación.

Con las consideraciones mencionadas para obtener esta velocidad de rotación se consiguió en el mercado local un sistema formado por un motoreductor de 4 etapas de las siguientes características:

Tabla 11

Características del Motoreductor

MOTORREDUCTOR TRIPLE ETAPA DE REDUCCION + VARIADOR MECANICO DE VELOCIDAD TIPO: PLANETARIO A SATELITES DE FRICCIÓN - TORNILLO SIN FIN CORONA - ENGRANAJES HELICOIDALES.
MARCA: MOTOVARIO (ITAL) MODELO: TXF002+NMRV040 + NMRV050 i +HA042 i30.55 = (6*60*100*44.1) POTENCIA: 1/6 HP / 6 POLOS (1100 RPM)
VELOCIDAD DE SERVICIO: 0.0008 RPM
TORQUE MÁXIMO DE SERVICIO: 140 Nm
DIÁMETRO DEL AGUJERO DE SERVICIO: 25 mm
VOLTAJE: 220 / 440 VAC – 60HZ – TRIFASICO
PROTECCION: IP55 CERRADO CONTRA POLVO Y AGUA
AISLAMIENTO CLASE F
VELOCIDAD DEL MOTOR: 1100 rpm
<i>De donde:</i>
<i>Primera etapa de reducción: 4 a 6 (variable) de la velocidad primaria</i>
<i>Segunda etapa de reducción: 60 de la velocidad primaria</i>
<i>Tercera etapa de reducción: 100 de la velocidad primaria</i>
<i>Cuarta etapa de reducción: 44,1 de la velocidad primaria</i>

<i>Para la primera etapa de reducción va desde: 1100rpm / 5 veces</i>
<i>La velocidad obtenida en la primera etapa es: 220rpm</i>
<i>Para la segunda etapa de reducción es: 220 rpm /60 veces</i>
<i>La velocidad obtenida en la segunda etapa es: 3.66 rpm</i>
<i>Para la tercera etapa de reducción es: 3.66 rpm/ 100 veces</i>
<i>La velocidad obtenida para la tercera etapa es: 0,03666 rpm</i>
<i>Para la cuarta etapa de reducción es: 0,0366rpm/44,1 veces</i>

Fuente: MOTOVARIO 2015

La velocidad obtenida para la cuarta etapa es: 0,000831rpm que es la velocidad final en el eje. El equipo completo se muestra en la Figura 36.

La velocidad teórica al final del proceso de reducción, es prácticamente coincidente con la velocidad requerida en el eje cuando la frecuencia del motor es 60 Hz, sin embargo al ser elementos mecánicos, cuya precisión en el proceso de reducción no necesariamente coincide con la teórica, se ha conseguido que la primera etapa del reductor sea variable, de tal manera que, si la reducción disminuye desde 6 la velocidad final aumentará, la reducción se consigue mediante una perilla acoplada a la etapa variable.



Figura 36: Equipo Motoreductor con 4 etapas de reducción acoplado al sistema

La perilla mecánica tiene 6 giros de 360 grados o 6 revoluciones que hace que varíe desde 4 veces (velocidad mínima) a 6 veces (velocidad máxima) la velocidad de salida de la primera etapa del motoreductor, por lo tanto se tiene un incremento de velocidad de 2 veces (Δvel) para 6 revoluciones, entonces:

$$x = \frac{2 \Delta vel}{6 rev} \times 3 rev$$

$$x = 1 \Delta vel$$

Donde $X = 1$ incremento de velocidad

Por lo tanto: si se agrega a la menor velocidad 3 revoluciones equivaldrá a tener 5 veces la velocidad de salida.

Como se requiere una velocidad precisa en el eje para el seguimiento del sol, y si se aumenta la velocidad a través de la etapa mecánica variable del moto-reductor, es necesario reducir la velocidad por otro medio, en tal caso, se ha instalado un variador de velocidad para el motor eléctrico que funciona a una frecuencia menor de la nominal, de esta manera el ajuste en la velocidad de seguimiento es mucho más fino, electrónicamente se consigue una variación en la frecuencia en décimas de HZ y es controlada digitalmente.

Por lo tanto el ajuste fino de la velocidad de seguimiento del sol se ha conseguido mediante la variación de la frecuencia en el moto-reductor, esta velocidad se encontró mediante un proceso de prueba y error, al no saber con exactitud la reducción de la etapa mecánica. El proceso fue poner en funcionamiento al sistema por intervalos de tiempo de 20 minutos e ir ajustando la velocidad entre el TSV y el Tiempo del Sistema hasta que prácticamente sean iguales, se consiguió a 36 Hz del motor con un variador de velocidad Powerflex, marca Hallen Bradley con capacidad para 1 Hp.

El siguiente diagrama muestra las partes involucradas en el proceso.

DIAGRAMA DE PARTES MECÁNICAS

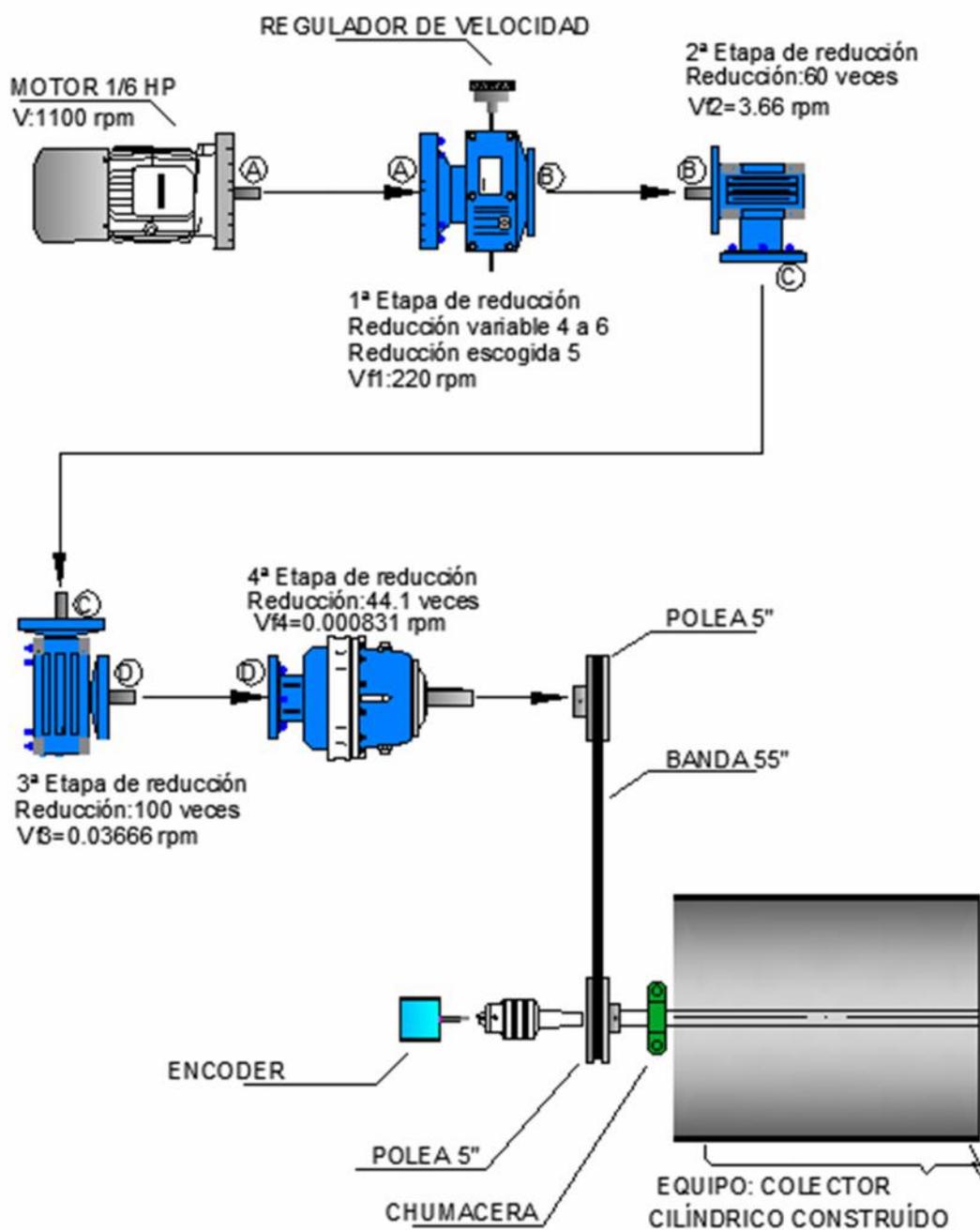


Figura 37: Diagrama de partes mecánicas

3.3.4 DISEÑO ELÉCTRICO DEL SISTEMA DE SEGUIMIENTO

3.3.4.1 DISEÑO DEL SISTEMA DE FUERZA

El sistema de fuerza comprende el análisis de las cargas de los equipos instalados y futuros que comprenden el Megaproyecto del CCP, los equipos actuales son: motor seguidor, sistema de control, sistemas auxiliares. Los equipos futuros serán bomba de aceite y bomba de agua, la tabla 12 muestra el estudio de carga del tablero de fuerza y control del CCP.

Tabla 12

Tablero seguidor parabólico

DESCRIPCIÓN	CANT	VOL	P. NOM	P INS	FSn	P DEM	R	S	T	N	G	PROTEC	CABLE	
	(U)	(V)		(W)		(W)								
MOTOR SEGUIDOR	1	220	1/6 HP	125	1,0	125	X	x	x		x	3P-30A	3X12+12 THHN AWG	
MOTOR BOMBA ACEITE	1	220	1.5 HP	1200	1,0	1200	X	x	x		x	3P-30A	3X12+12 THHN AWG	
MOTOR BOMBA AGUA	1	220	0.5 HP	400	1,0	400	X		x		x	2P-20A	2X12+12 THHN AWG	
SISTEMA DE CONTROL	1	120	200W	200	1,0	200	X			X	x	1P-6A	12(12)+12 THHN AWG	
TOMACORRIENTES	2	120	200W	200	0,5	100		x		X	x	1P-20A	12(12)+12 THHN AWG	
LUZ DE SALA	1	120	22W	22	0,6	13,2			X	X	X	1P-20A	12(12) THHN AWG	
				2162	PT=	2,0	KW							
AMPERAJE DEL TABLERO POR FASE =							5,82	A	CABLE A USAR =					3*8(8)+10 THHN FLEX AWG
											DISTANCIA =	40	MTS	
											CAIDA DE VOLTAJE =	0,46	%	
													PROTECCIÓN =	3P-50A

Se ha considerado la instalación de un único tablero que contiene el sistema de fuerza y de control del CCP, éste recibe la alimentación de 3 fases R,S,T un Neutro y Tierra.

a) Alimentación del motor principal

El motor es de 1/6 Hp o su equivalente a 0,124kW, la corriente del motor según datos de placa es 0,118 amperios para un voltaje de 230 voltios. Las etapas en este proceso de alimentación son las recomendadas según la norma del NEC, es decir se deberá utilizar un cable con la capacidad de 125% veces la corriente del motor, y la protección deberá ser 1,25 veces la corriente nominal del cable. (Stallcup J., 2005, págs. 13-20)

El cable de alimentación de energía es 3x12+12TW AWG tipo concéntrico cuya capacidad es 20 Amp por cable, se encuentra sobredimensionado para la corriente del motor, sin embargo, se adquirió por ser un producto común en el mercado, La protección principal del motor, como se determina según la norma NEC, protege 1,25 veces la corriente que soporta el cable por lo tanto, se ha instalado un disyuntor trifásico de 30 Amp. El contactor también es de 30 Amp y el térmico instalado protege las sobre corrientes que se puede producir por sobrecarga del motor, la corriente del térmico varía entre 0,33 y 1 Amp y se ha seteado a 0,5 Amp.

b) Alimentación del Sistema de Control

La fuente de alimentación del sistema de control comprende los sistemas electrónicos, focos de señalización del sistema y protección de sobre voltajes por medio de una protección de transitorios basado en varistores.

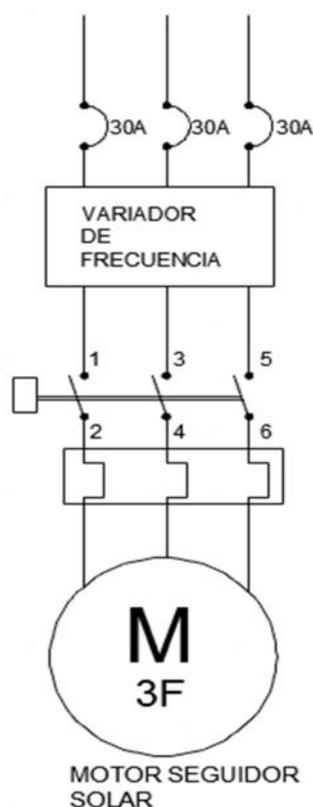


FIGURA 38: Diagrama de fuerza del Motor

El cable que se usa para control es No 16 TW flex AWG, el voltaje de trabajo es 120 voltios, la fase es la que alimenta a los equipos y la que se corta mediante los sistemas de control, el neutro está en una barra y es el común para los equipos de control. El disyuntor que protege el sistema de control es monofásico de 6 amp.

El sistema de protección de transientes es un grupo de varistores con conformación trifásica de 6 kA, con alimentación de Cable No 10 AWG y el disyuntor de protección y corte, es un disyuntor trifásico de 30 amp.

c) Sistemas Auxiliares

Los sistemas auxiliares son: El sistema de iluminación de la casa de máquinas que corresponde a un foco de 22 w y dos tomacorrientes de 200w cada uno, el cable utilizado es 12(12) TW AWG y el disyuntor de protección es de 20 amp.

Para usos de otros sistemas, pero que no son parte de este trabajo, se ha considerado la protección y alimentación hacia otros motores que son una bomba de aceite y una bomba de agua, el cálculo respectivo se refleja en la tabla No 12.

Se ha instalado una varilla de puesta a tierra, a la cual se ha aterrizado toda la estructura metálica del CCP, el tablero eléctrico y los motores del sistema, se ha realizado la medida de puesta a tierra con un Telurómetro Marca Proskit y el valor de la puesta a tierra marca 4,8 ohm, que está bajo los parámetros máximos de la Empresa Eléctrica Quito para puesta a tierra de medidores y redes de bajo voltaje.

La acometida principal nace en el tablero de disyuntores ubicado en el Laboratorio de Mecánica con un disyuntor trifásico de 3x50 amp. Se usa un cable 4x8 TW AWG Flexible Concéntrico y llega hasta el tablero eléctrico ubicado en la casa de máquinas del CCP. En el interior del tablero se llega a un disyuntor de 3x40 Amp. Y luego de este a un interruptor de fuerza de 2

posiciones de 3x40 Amp. Para luego ingresar a la barra de conexión de la etapa de fuerza.

SEGUIDOR SOLAR DIAGRAMA DE FUERZA

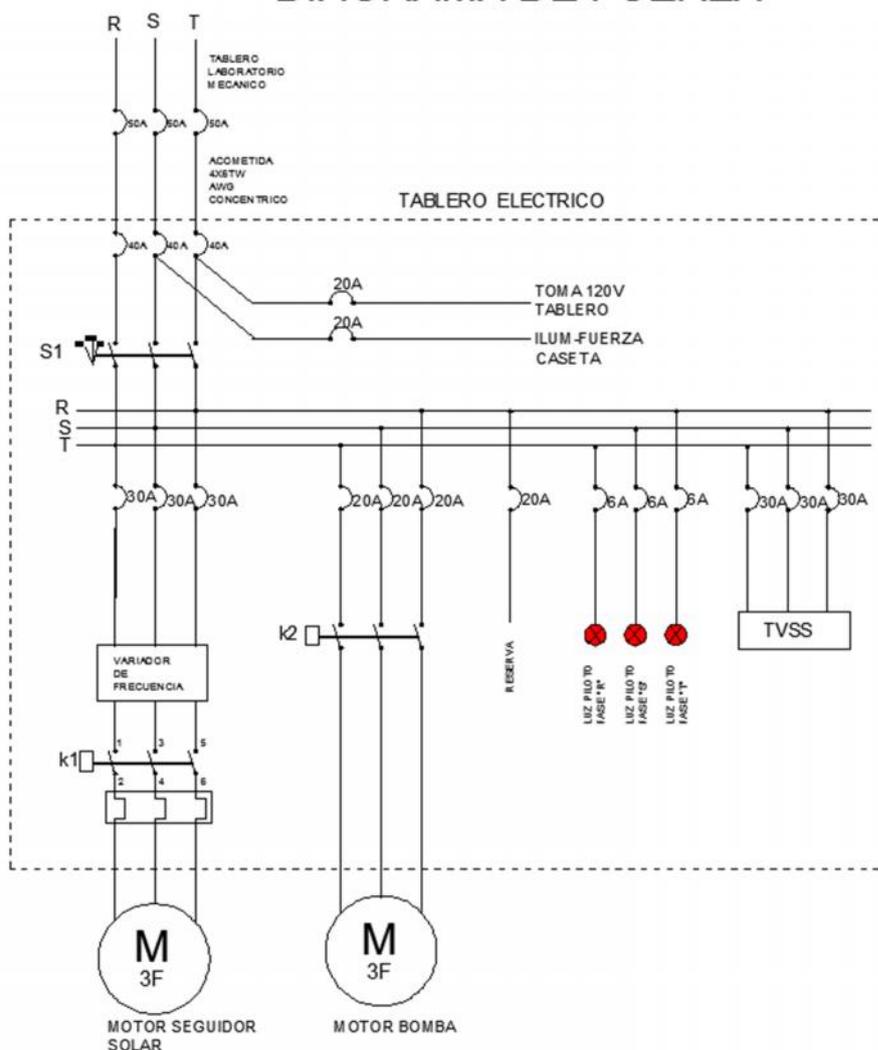


FIGURA 39: Diagrama del Sistema eléctrico

3.3.5 DISEÑO ELECTRÓNICO DEL SISTEMA DE SEGUIMIENTO

Todo el sistema electrónico diseñado y construido ha sido para controlar el posicionamiento del cilindro-parabólico en su seguimiento del sol.

3.3.5.1 ANÁLISIS TEÓRICO DEL SISTEMA DE CONTROL

En este apartado se describirá el sistema de control a utilizar mediante el análisis de la función de transferencia de la dinámica del sistema y su respuesta ante una entrada tipo rampa. Además de detallará su estabilidad en lazo abierto y los diagramas de respectivos.

a) Función de transferencia del sistema

Para determinar la función de transferencia que representa al sistema se realizó una prueba experimental tomando datos de la entrada que son horas del día, las cuales representan el tiempo solar; así mismo se tomaron datos de la salida que es la posición del CCP a la cual le corresponda cierta hora que será el tiempo del sistema, por lo tanto, el sistema simplificado se lo podría definir un sistema de lazo abierto donde la entrada corresponde al TSV y la salida corresponde al tiempo del sistema que es la posición del CCP

Para el tiempo solar se utilizó un reloj y para la salida un encoder que mediante la posición angular del panel y un cálculo matemático arrojó finalmente datos del tiempo del sistema; para la prueba se activó el sistema desde las 12:00 hasta las 16:00 obteniendo los siguientes datos en la tabla 13.

Tabla 13

Datos de entrada y salida en lazo abierto

ITEM	TSV (Entrada)	Tiempo Sistema (Salida)	ITEM	TSV (Entrada)	Tiempo Sistema (Salida)
1	11,9535866	11,9744444	15	14,461791	14,4944448
2	12,1411161	12,1411114	16	14,5789967	14,6611109
3	12,2817631	12,3072224	17	14,8134079	14,8275
4	12,4692917	12,4741659	18	14,9071732	14,9938889
5	12,7037039	12,6408329	19	14,9071732	14,9944448
6	12,7037039	12,6411114	20	15,0243788	15,1611109
7	12,8677921	12,8075	21	15,3056726	15,3280554
8	12,9615564	12,9741659	22	15,4932022	15,4947224
9	13,1959686	13,1405554	23	15,6807308	15,6602774
10	13,4069386	13,275	24	16,0089073	15,9925

11	13,4069386	13,275	25	16,0089073	15,9925
12	13,4069386	13,275	26	16,0089073	15,9925
13	13,5241451	13,5169439	27	16,0089073	15,9925
14	14,3445854	14,1608334	28	16,0089073	15,9925

Con la ayuda del software MATLAB y su herramienta de identificación de sistemas denominada SYSTEM IDENTIFICATION y PID TUNER a partir de los datos experimentales de entrada y salida se obtuvo una función de transferencia estimada que se ajustó con una exactitud del 90% obteniendo el siguiente resultado:

$$F_t = \frac{231}{s + 228,6}$$

Para determinar el comportamiento del sistema se realizaron simulaciones ante entrada escalón unitario como se ve en la figura 37, pero cabe recalcar que el comportamiento al cual debe acoplarse el sistema, es ante una entrada rampa puesto que en el tiempo solar varía linealmente y la salida debe seguir este comportamiento para la cual se realizó una simulación como se observa en la figura 40.

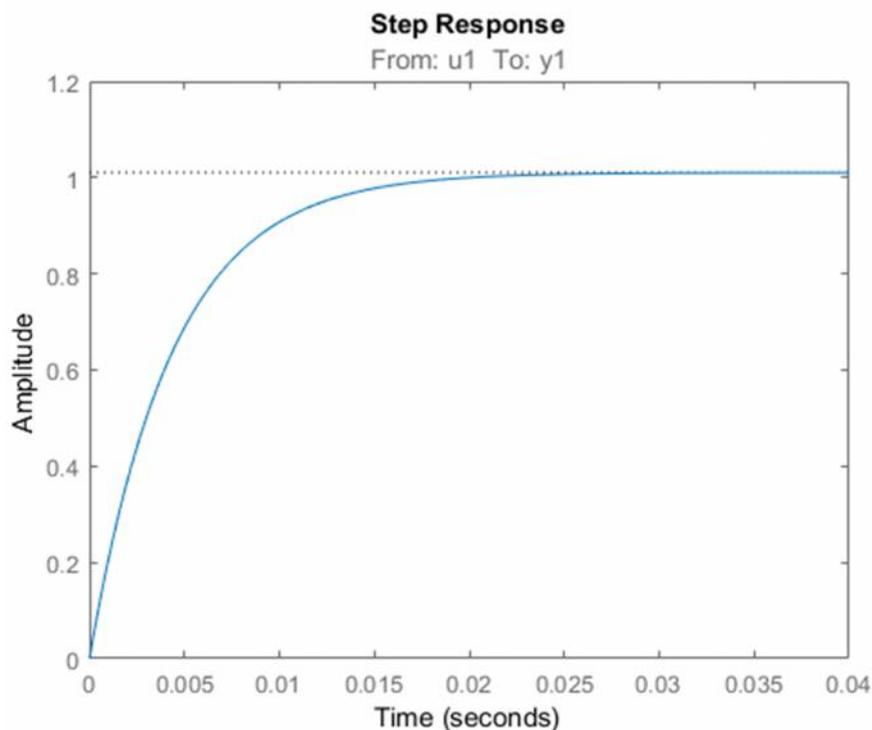
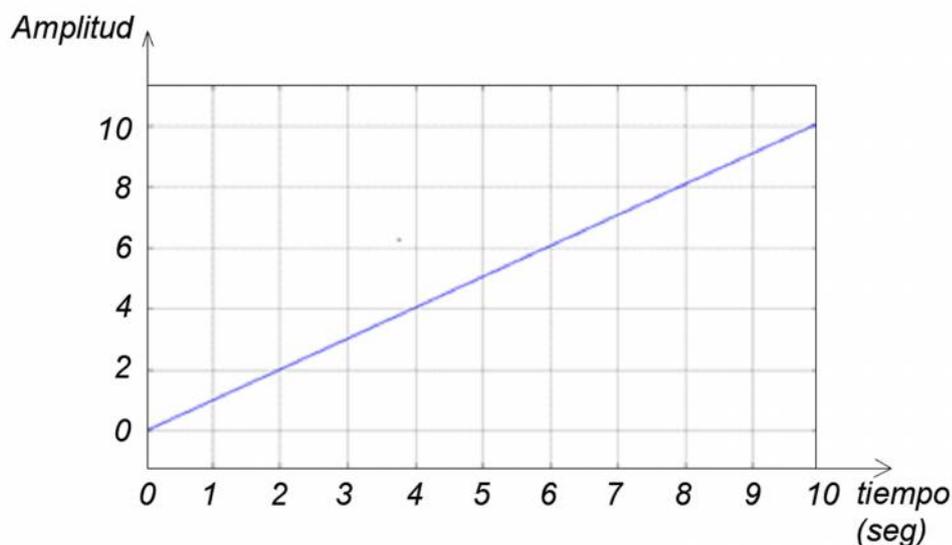


FIGURA 40: Comportamiento Sistema ante Entrada Escalón**Figura 41: Comportamiento Sistema ante Entrada Rampa**

Dado que el Sistema sigue perfectamente una entrada rampa el control en lazo abierto es suficiente, además que la precisión de la salida depende únicamente de la programación del controlador.

b) Estabilidad del sistema

Para asegurar que el sistema sea estable con la ayuda del software MATLAB se obtuvo un gráfico característico de la función de transferencia estimada del sistema denominado diagrama de Nyquist como se observa en la FIGURA 42. Debido a que su espacio geométrico se encuentra a la derecha del eje de las "Y" sin cruzar hacia el seiplano izquierdo del plano complejo y además solo posee un polo que se ubica en rojo en el eje "x" negativo, se puede afirmar que el sistema en lazo abierto es estable.

Sin embargo, por seguridad del sistema se ubicará un Encoder, que cada cierto período censará el tiempo de salida, con objeto de comparar la posición del sistema respecto del tiempo solar, de tal manera que pare el sistema si está en adelanto o cambie de velocidad a una mayor si está en retraso para alcanzar el TSV es decir en base a una lógica de control ON/OFF así se corregirá las fallas del posicionamiento del CCP que pueden

existir por efectos externos como diferentes perturbaciones principalmente mecánicas, como son la distribución no uniforme de los pesos de equilibrio, la elasticidad de la banda, la acción del viento, etc.

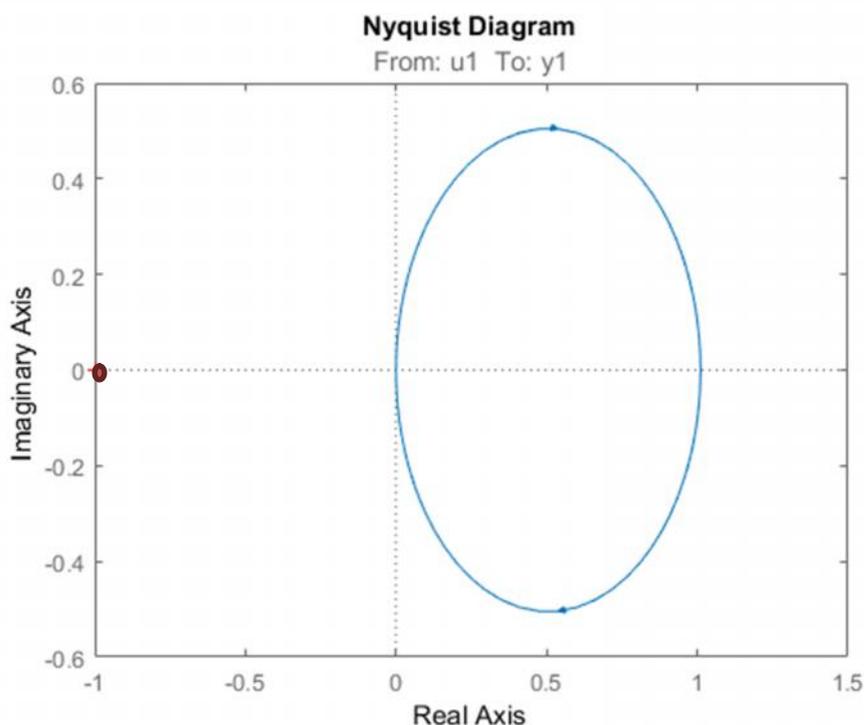


Figura 42: Diagrama de Nyquist

Cabe recalcar que este tipo de control corrige la salida en base a programación por lo tanto sigue siendo de lazo abierto, responde a una sistema de lógica cableada y controlada a través del PLC.

3.3.5.2 Descripción de los elementos a controlar

Si bien es cierto que el sistema puede funcionar en lazo abierto ya que el comportamiento del TSV y el tiempo del sistema son dos relojes calibrados con un arranque a una hora determinada, sin embargo, es necesario controlar varios parámetros del sistema para garantizar el correcto funcionamiento del mismo por lo tanto, el control del equipo CCP requiere información basada en los sensores dispuestos en el sistema.

Encoder.- Es el que debe determinar la posición del eje del sistema, de tal forma que se sepa su posición, lo más cercana a la ubicación del sol, se escogió para tal efecto que el elemento sensor sea un Encoder de posición.

Si se hace una correspondencia ideal se debería tener 1 segundo = 1 pulso esto implica que en 1 revolución de 24 horas = 1440 min = 86400 segundos, por lo tanto debería adquirirse un Encoder de 86400 segundos, dicho elemento no existe en el mercado local, y a nivel mundial es extremadamente costoso.

Por lo tanto se hará este análisis ideal para 1 minuto = 1 pulso, de donde 1 revolución de 24 horas = 1440 minutos = 1440 pulsos, este elemento tampoco existen en el mercado, por lo tanto se hizo la adquisición de un Encoder lo más cercano a este valor, se encontró uno que tiene 1000 pulsos por revolución.

$$x = \frac{1440 \text{ min}}{1000 \text{ pulsos}} \times 1 \text{ pulso}$$

$$x = 1,44 \text{ minutos}$$

Y por lo tanto el ángulo girado cada pulso corresponde a:

$$x = \frac{15^\circ}{60 \text{ min}} \times 1,44 \text{ min}$$

$$x = 0,24^\circ$$

El Encoder de Posición adquirido en el mercado local, se encuentra acoplado directamente al eje, su resolución es de 1000 pulsos por revolución, que representa $0,24^\circ$ angulares o 1,44 minutos a la velocidad del movimiento del sol. Este elemento es del tipo incremental, es decir, no presentan una posición absoluta o fija como referencia, por lo tanto, a partir de una lectura que se haga del Encoder respecto de una posición

determinada (12H00PM), será el punto de partida hacia atrás o delante de los pulsos medidos por el PLC.

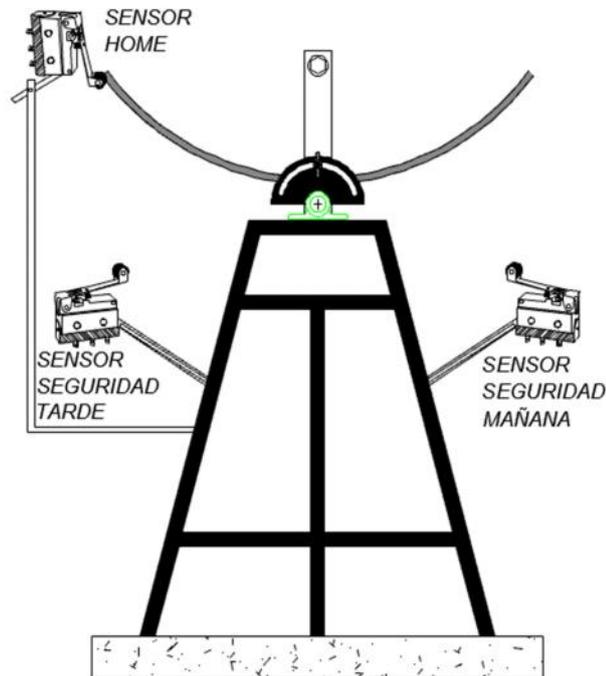


Figura 43: Vista lateral del Seguidor con la ubicación de los sensores instalados.

Se ha determinado que el Encoder cada día encere su ubicación respecto del sensor que determina la posición de las 12h00 PM, por lo tanto esta se marcará en el ENCODER como posición 0.

Las horas anteriores, es decir desde las 9h00 AM hasta las 12h00PM se medirán con pulsos negativos en el ENCODER. Y se tiene 3 horas o 180 minutos de diferencia que corresponde a un giro de 45° donde:

1 pulso -----1,44 min

X -----180 min

Donde:

X = 125 pulsos

Las horas posteriores es decir desde las 12h00 PM hasta las 4h00 PM se medirán con pulsos positivos del Encoder y se tiene 4 horas o 240 minutos de diferencia que corresponde a un giro de 60° de donde:

$$1 \text{ pulso} \text{ -----} 1,44 \text{ min}$$

$$X \text{ -----} 240 \text{ min}$$

Donde:

$$X = 167 \text{ pulsos}$$

Con estos datos que son el mínimo (-125 pulsos en la mañana) y el máximo (167 pulsos en la tarde) se guardan en el PLC y cada pulso se transforma en un ángulo que ha girado el sistema, a la frecuencia de 36 Hz se convierte en la velocidad que coincide para seguir a la posición del sol de acuerdo al TSV.

Como se explicó anteriormente el tiempo del sistema y el TSV se comparan cada 20 minutos para verificar si están iguales o si el sistema tiene que pararse si está en adelanto o cambiar su velocidad a 60 Hz hasta alcanzar el TSV, y si el tiempo del sistema y el TSV son iguales la velocidad se mantiene en 36 Hz.

Sensor Tipo Switch Fin De Carrera De HOME.- Este sensor identifica la posición HOME o inicial del sistema, la ubicación marca las 12H00PM del sistema, y su señal permite el encendido o la posición 0 del Encoder. La figura 43 muestra este sensor.

Sensor Tipo Switch Fin De Carrera De Seguridad En La Mañana.- Este sensor es un tope de seguridad cuando el giro del sistema es horario, y también cuando se encuentra buscando la posición de la hora de arranque en la mañana, llega hasta este sensor y el sistema se para por seguridad o regresa en sentido anti horario buscando la posición de HOME.

Sensor Tipo Switch De Fin De Carrera De Seguridad En La Tarde.- Este sensor permite actuar como un tope de seguridad cuando el giro del sistema es anti horario, es decir, se encuentra buscando la posición en la hora final de la tarde, si por alguna razón llegase a pasar de la hora final de seguimiento del sol, el sistema llega hasta este sensor y se para o regresa en sentido horario. La figura 36 muestra la ubicación de estos sensores.

Sensor de Reset.- Permite realizar el reseteo del sistema y lo reinicializa, se encuentra ubicado en el tablero de comando.

DETERMINACIÓN DEL TSV

La creación del TSV parte de la creación de un Timer que genera horas, minutos y segundos, luego se realiza la lectura del tiempo de la computadora o del PLC, el mismo que corresponde a la hora civil del Ecuador, a partir de esta lectura que se realiza diariamente, se procede a utilizar la tabla que corresponde a la ecuación del tiempo, dicho valor dependiendo de cada mes se suma al TSV, así se tiene el tiempo con el que se trabaja diariamente.

3.3.5.3 Procesamiento de control basado en PLC

a) Hardware

Un PLC tiene la capacidad de recibir señales eléctricas como entradas, se procesan en el CPU conforme alguna programación almacenada en la memoria del PLC, y luego el equipo coloca en sus salidas, señales eléctricas que permiten realizar alguna acción determinada.

El PLC utilizado es marca Allen-Bradley Micrologic. Modelo 1400

Sus características son:

- 20 entradas y 12 de Salidas sin sistemas de expansión.
- Hasta 6 Contadores de alta velocidad de 100kHz incorporados.
- Puerto Ethernet
- Pantalla LCD que permite ver el estado del controlador y de las E/S

- Dos puertos serie con soporte de los protocolos DF1, DH-485, Modbus RTU, DNP3 y ASCII.

Las entradas del PLC aceptan una señal eléctrica analógica o digital estandarizada (4-20mA, 1-5Vcd, 24Vcd, etc.) En este proceso de seguimiento solar se utilizan entradas y salidas digitales y para control del variador de frecuencia se utiliza el pòrtico DH-485 del PLC, que es para comunicación serial.

El diagrama de control según la figura 44 determina el conexionado del PLC

DIAGRAMA DE CONTROL

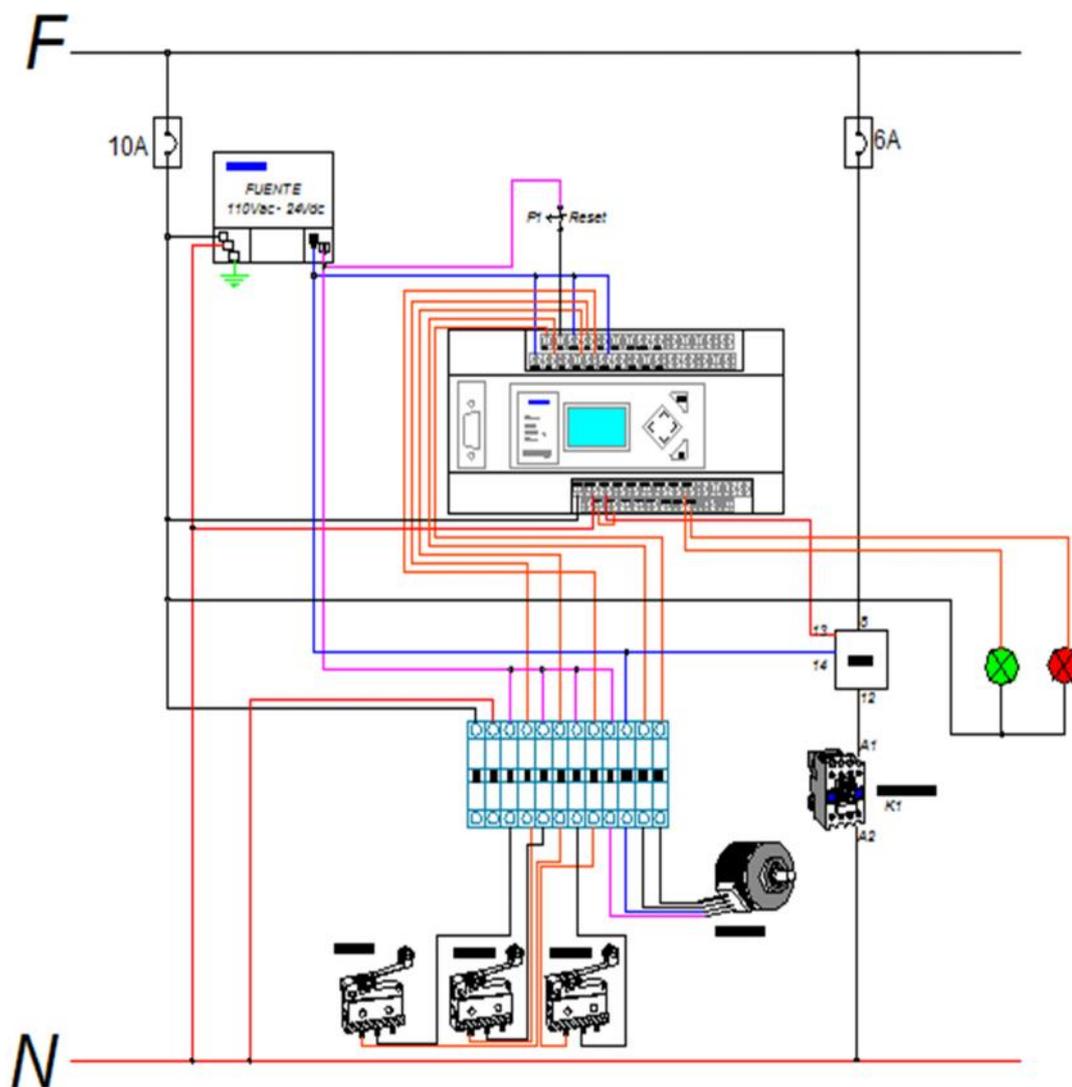


Figura 44: Diagrama de Control del PLC

b) software

Para el proceso de programación del PLC se ha utilizado el software RSLogix 500 según muestra la figura 45

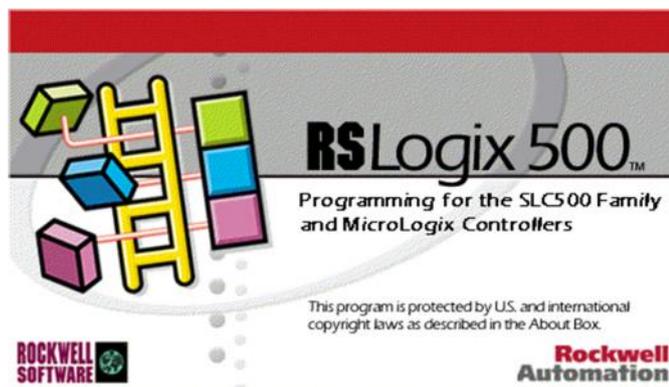


Figura 45: Software para programación del PLC Micrologic 1400

1) *Metodología Utilizada para realizar el control del Concentrador Cilíndrico Parabólico*

Se realizó las siguientes consideraciones para el diseño del software, el programa está configurado en una Rutina Principal y varias subrutinas, las mismas que se describen a continuación:

1 a) Rutina Principal.-

Es la rutina de programación que permite la activación en secuencia de las subrutinas, se muestra en la figura 46.

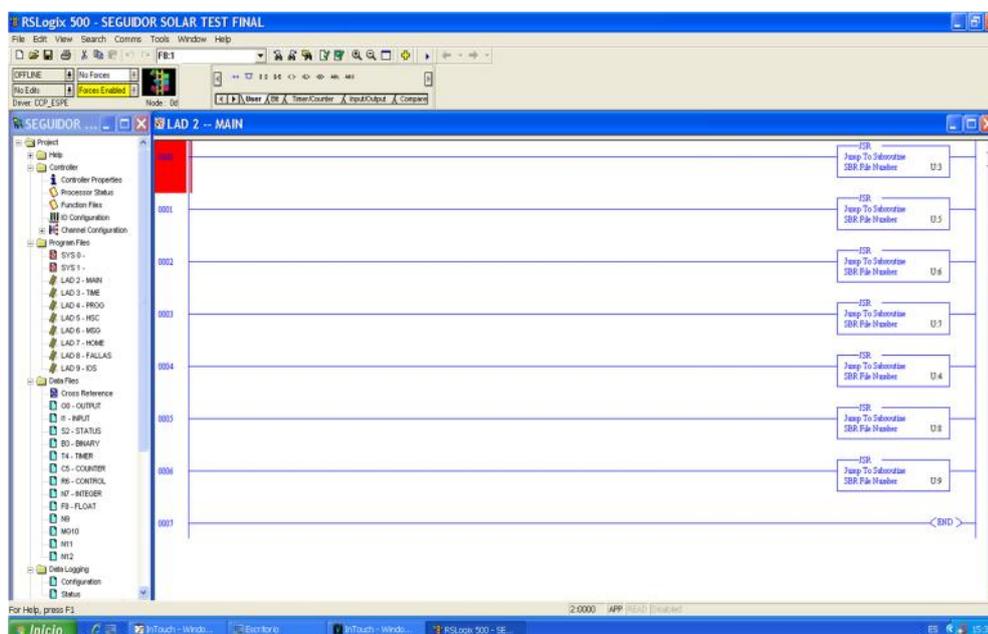


Figura 46: Imagen de Rutina Principal Software de programación del PLC

1 b) Subrutinas.-

- **SUBROUTINA TIME:** Genera el tiempo solar verdadero o TSV el cual es creado como un reloj del programa, usa como base el reloj interno del PLC pero se encuentra desplazado en minutos respecto de la hora civil, que es la hora que se lee en una computadora o que tiene el reloj interno del PLC, dependiendo del mes, incrementa o decrementa los minutos para acoplarse, según los valores de la ecuación del tiempo, para cada mes, además de la posición real del meridiano que pasa por la ESPE, esta subrutina arranca con el TSV calculado a la 1h00 AM del Tiempo Civil, todos los días.
- **SUBROUTINA HOME:** Realiza la ubicación del sistema cuando este ha perdido su posición, por ejemplo en una falla de energía, busca posicionarse girando a izquierda o derecha hasta encontrar la posición HOME, encera el contador del Encoder y marca el número de pulsos, que se traduce en un ángulo que corresponde a la posición de las 9H00 AM. El sistema arranca en el seguimiento solar cuando el TSV generado coincide con esta hora.
- **SUBROUTINA PROG:** Programa de Seguimiento del sol mediante el control de la posición de acuerdo a la hora del TSV, compararla con la hora del sistema y el TSV, parte con una velocidad de 36 Hz en el motor, pregunta cada 20 minutos si está en adelanto el tiempo del sistema respecto del TSV, si es afirmativo, para el motor hasta que los dos tiempos sean iguales, y continúa con la rutina de seguimiento por otros 20 minutos, si el tiempo del sistema está en retraso, cambia la velocidad del motor a una mayor que le permita alcanzar el TSV, una vez iguales los dos tiempos, regresa a la velocidad inicial y continúa con la rutina.
- **RUTINA MSG:** Esta subrutina mediante comandos propios del PLC realiza la comunicación entre el PLC y el Variador de Frecuencia mediante protocolo MODBUS.
- **RUTINA HSC:** Esta subrutina realiza la lectura externa de la posición del Encoder y lo guarda en un contador interno del PLC.

- RUTINA FALLAS: Realiza la gestión de fallas que pueden presentarse en el sistema.
- RUTINA IOS: Realiza la gestión de leer entradas externas y convertirlas en parámetros internos, de igual forma, parámetros internos que quiera escribir el PLC en las salidas externas.

El lenguaje de programación utilizado es el software RSLogix 500. Y utiliza la metodología ladder (escalera).

Desde la figura 47 hasta la figura 54 se muestra las subrutinas del programa de seguimiento solar en diagramas de flujo.

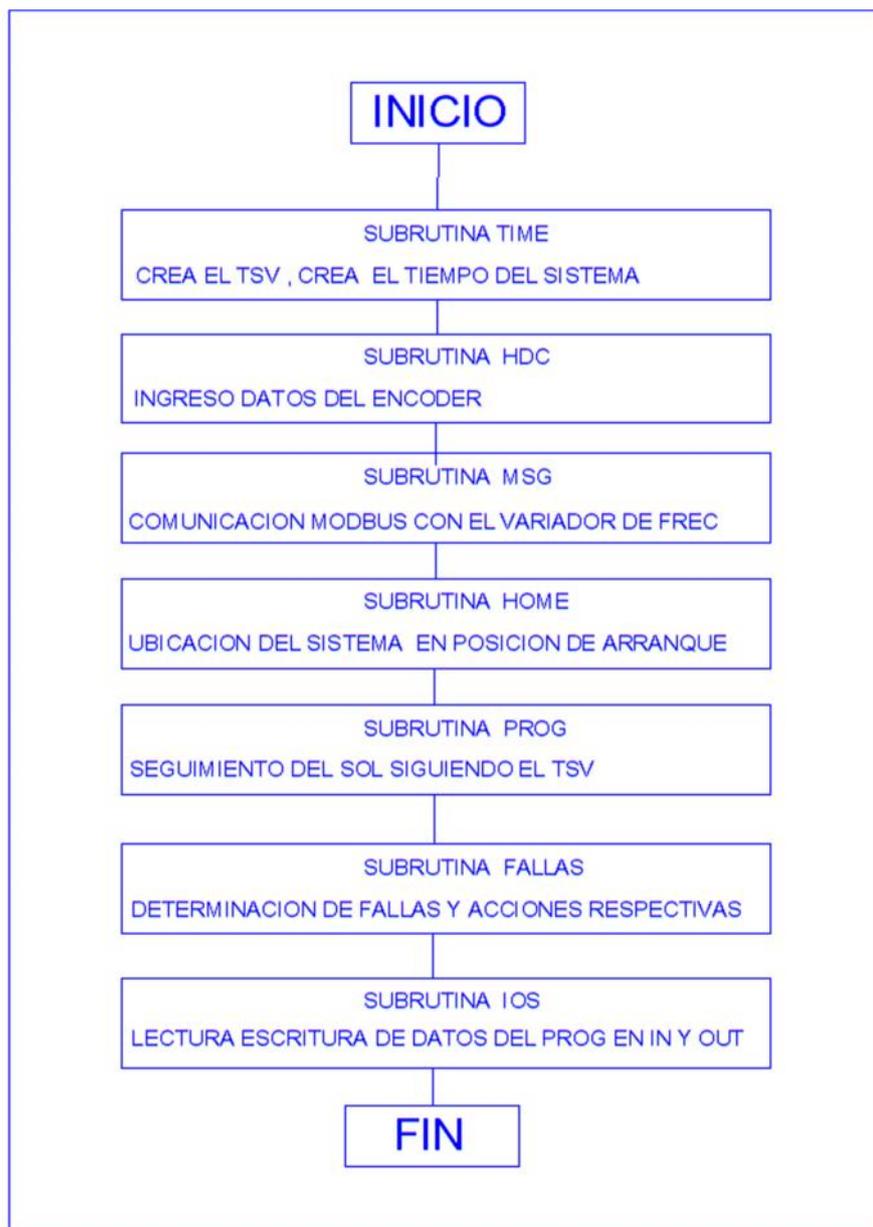


FIGURA 47: DIAGRAMA DE FLUJO – RUTINA PRINCIPAL

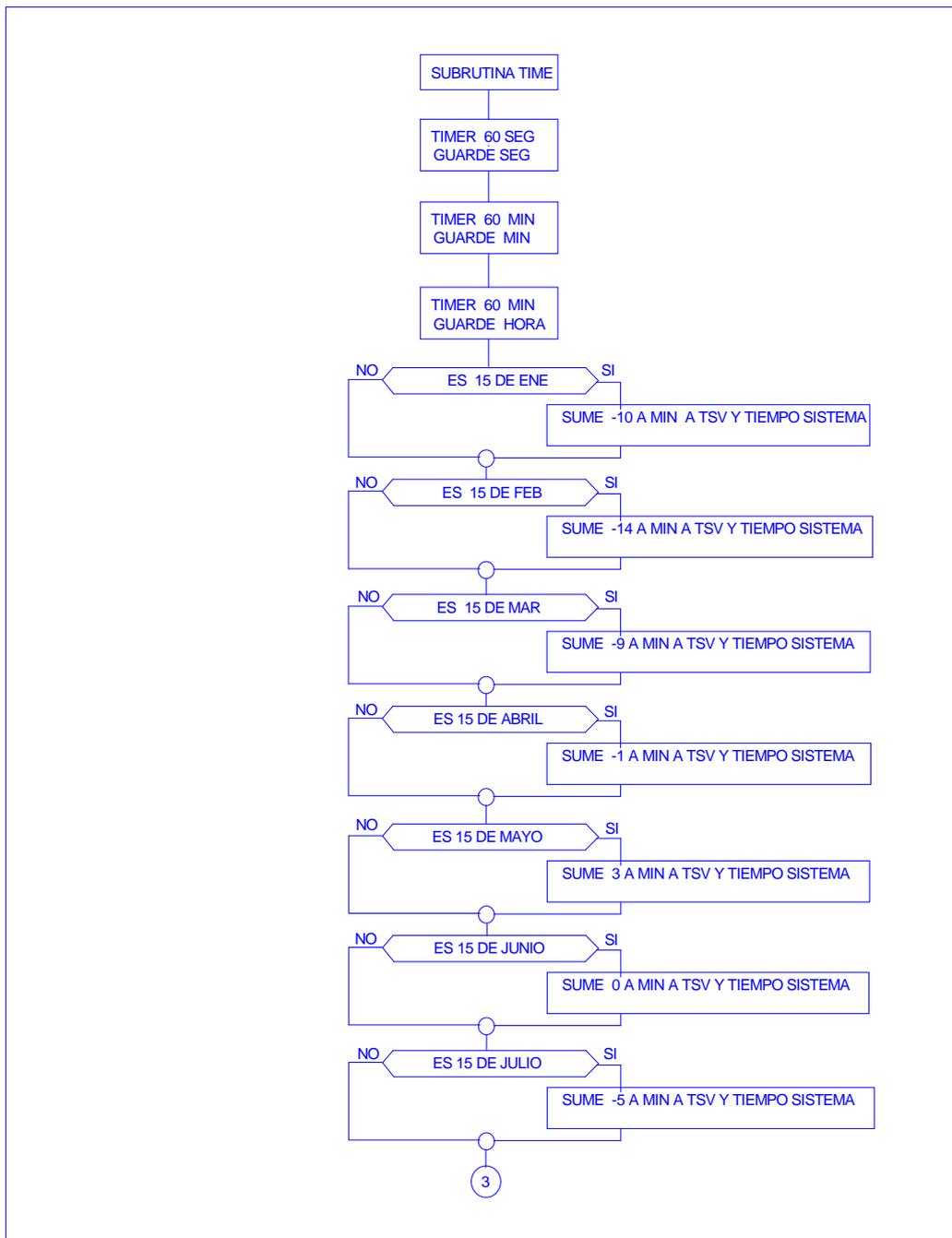


FIGURA 48: DIAGRAMA DE FLUJO – SUBROUTINA TIME PARTE A

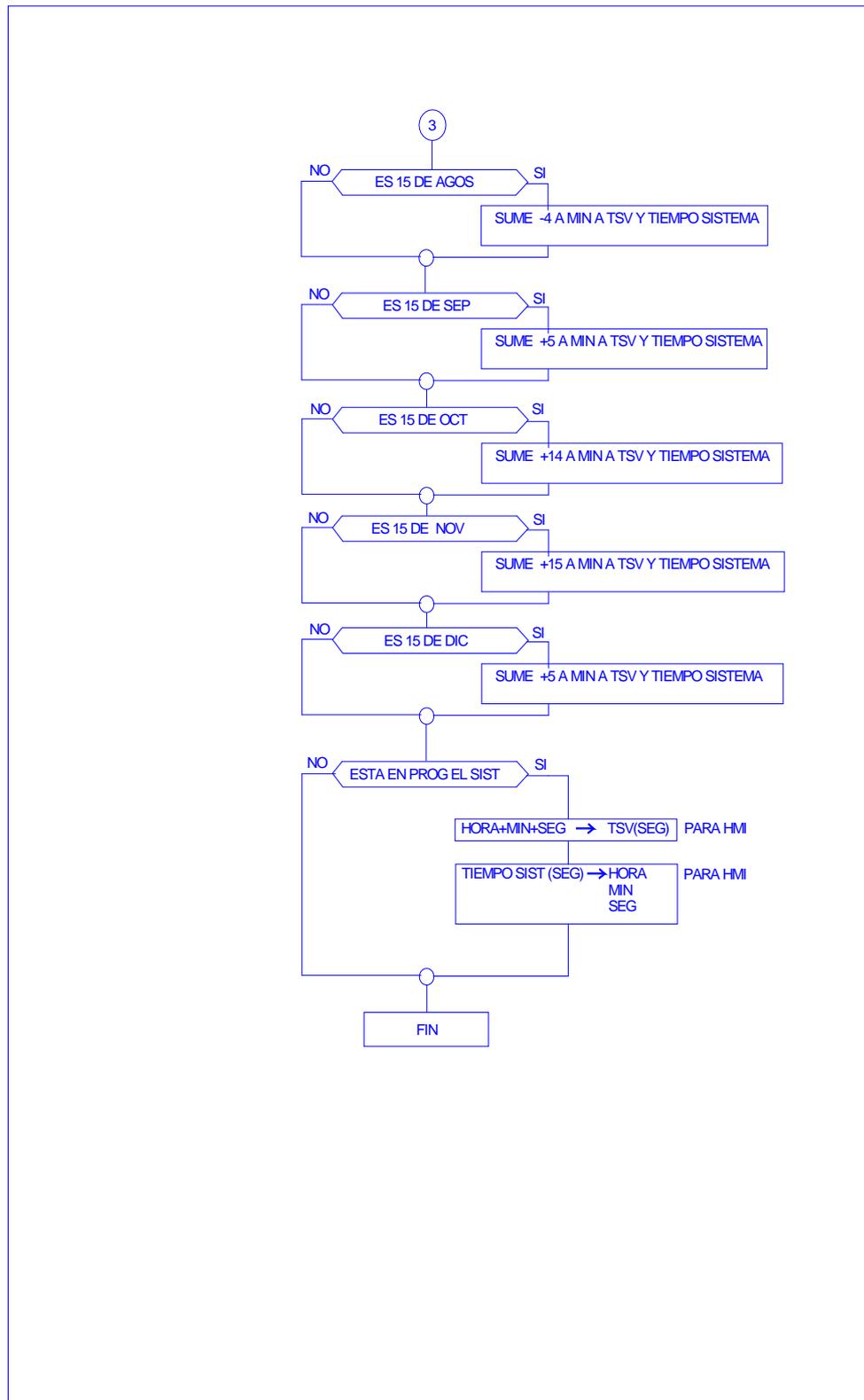


FIGURA 49: DIAGRAMA DE FLUJO – SUBROUTINA TIME PARTE B

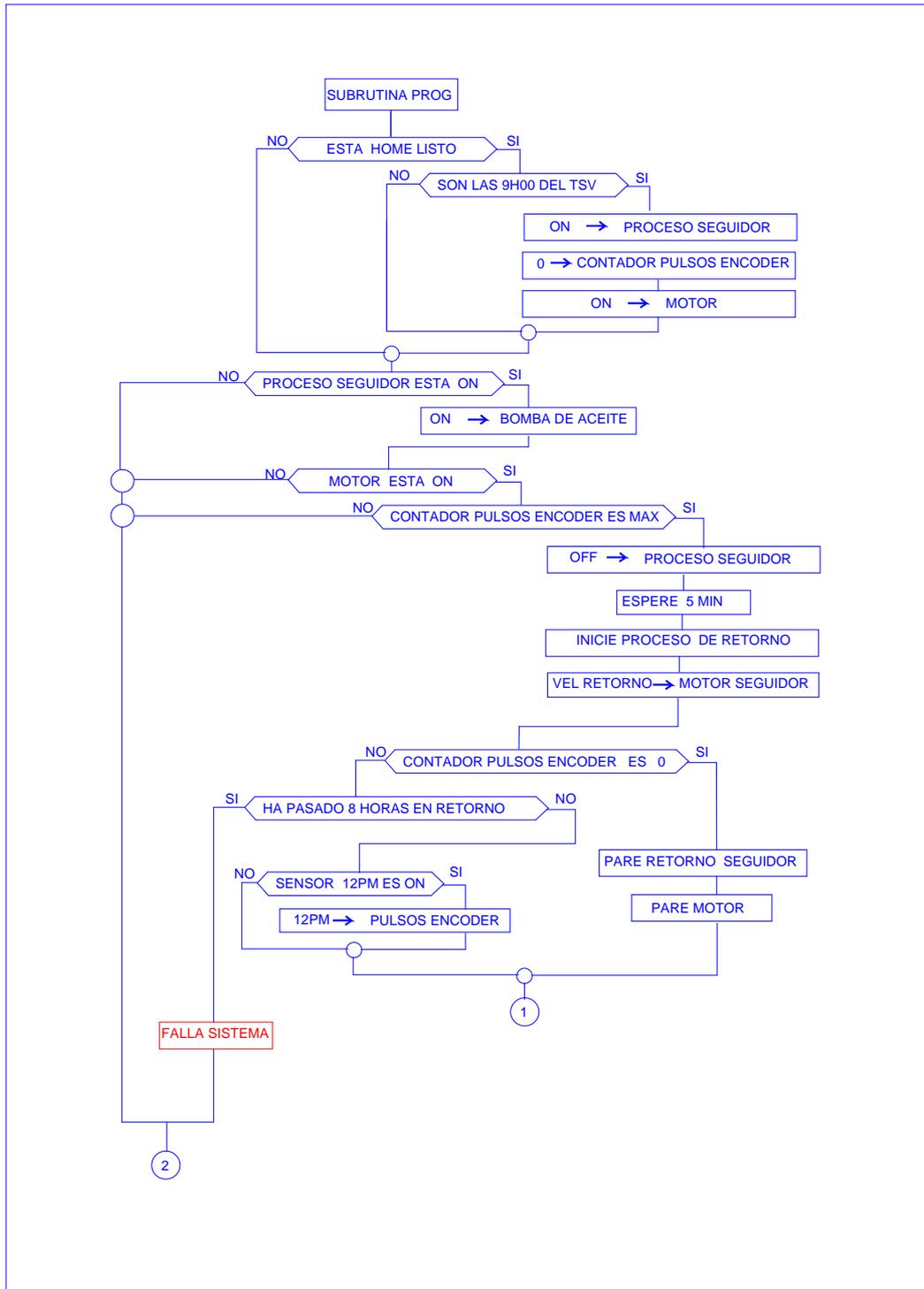


FIGURA 50: DIAGRAMA DE FLUJO – SUBROUTINA PROG PARTE A

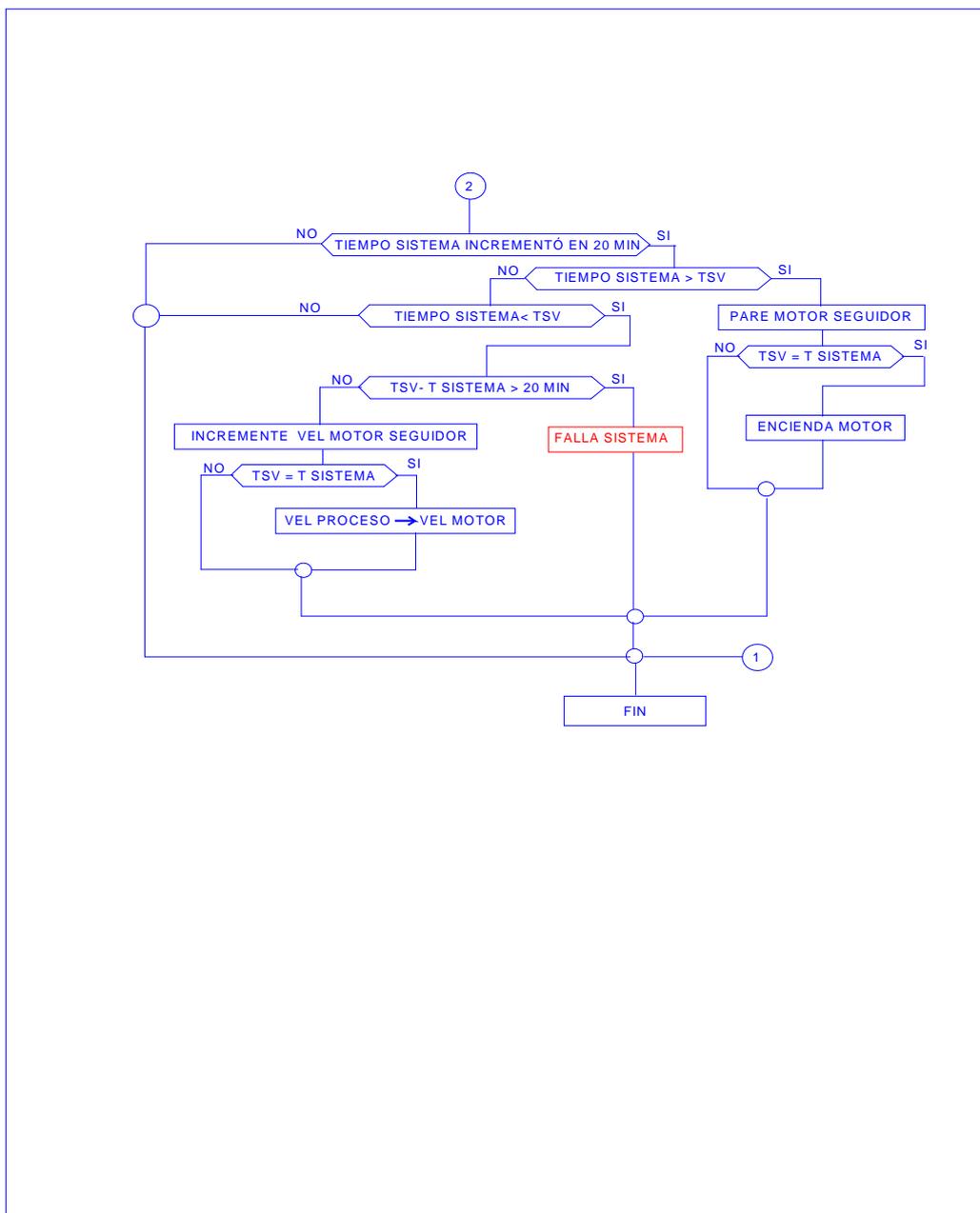


FIGURA 51: DIAGRAMA DE FLUJO – SUBROUTINA PROG PARTE B

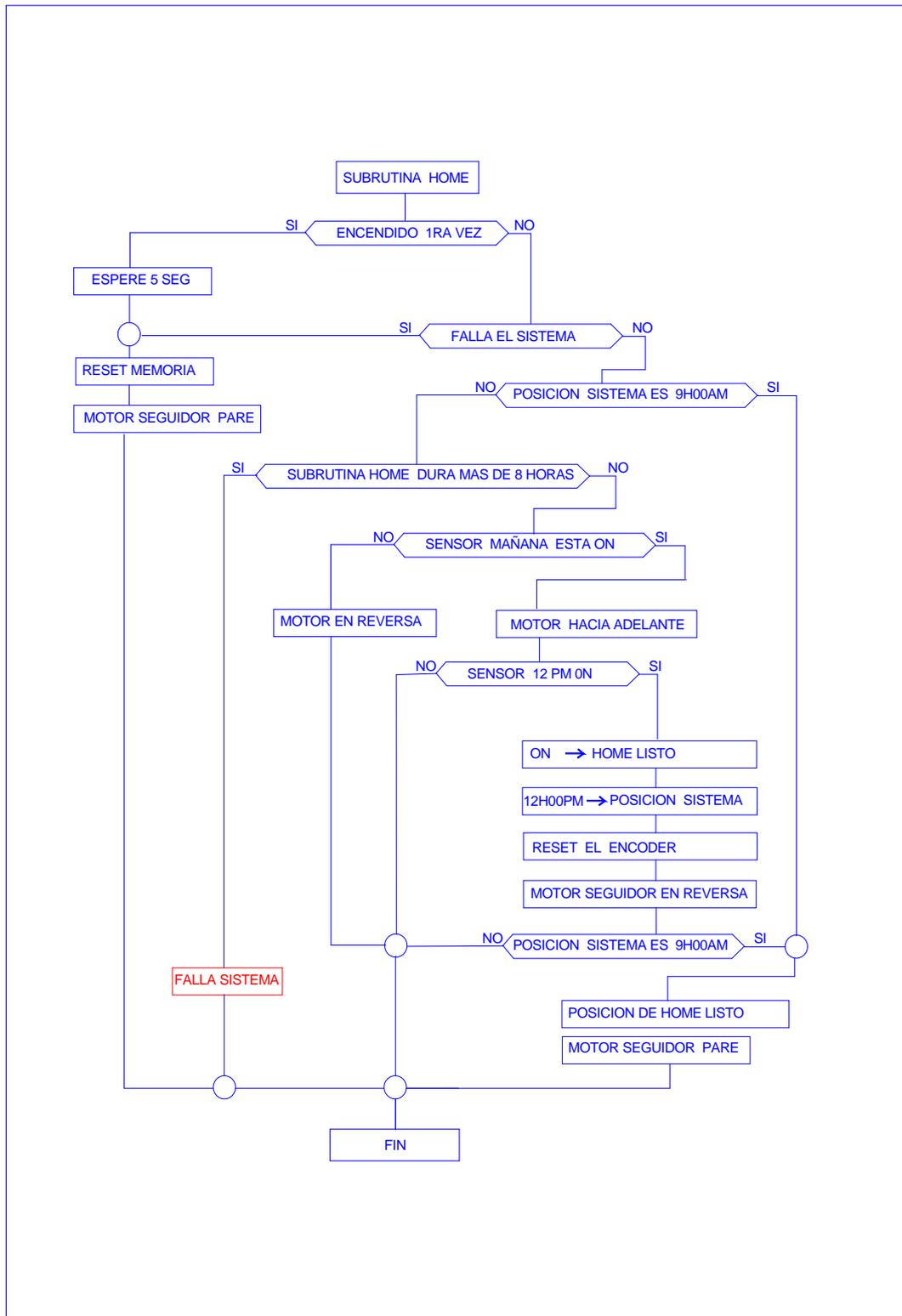


FIGURA 52: DIAGRAMA DE FLUJO – SUBROUTINA HOME

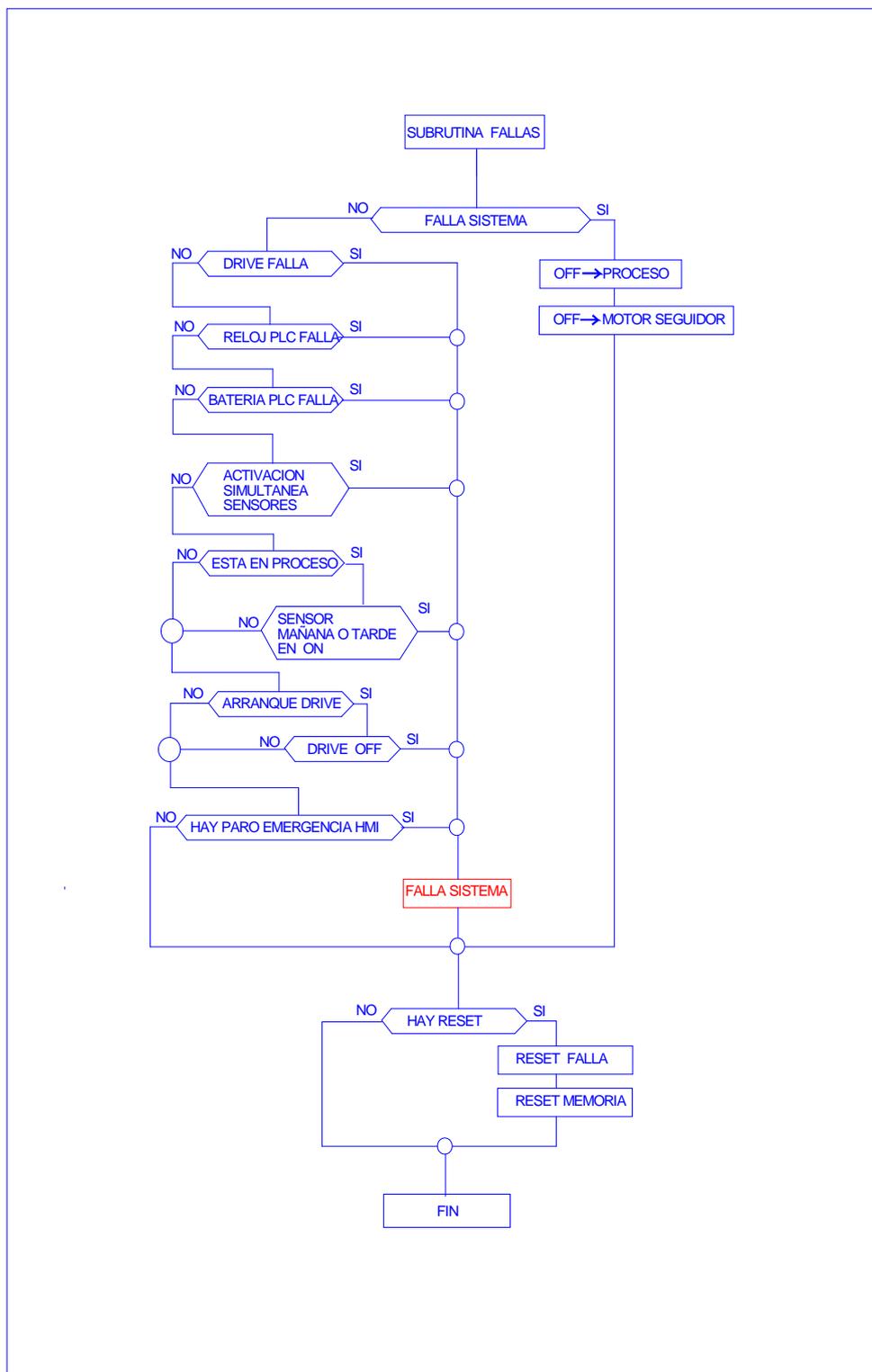


FIGURA 53: DIAGRAMA DE FLUJO – SUBROUTINA FALLAS



FIGURA 54: DIAGRAMA DE FLUJO – SUBROUTINAS IOS Y HSC

VISUALIZACIÓN DE RESULTADOS A TRAVÉS DEL INTERFACE HOMBRE MÁQUINA

Un Interface Hombre Máquina tiene por objetivo el control y monitoreo de procesos industriales. Existen marcas de software que permiten el diseño de sistemas HMI o SCADA tales como GE con Cimplicity o IFIX, RSview de Rocwell Automation, Labview de National Instrumental, Wonderware con Intouch etc.

El Software utilizado para este proceso es INTOUCH bajo un entorno de PC. El sistema Operativo utilizado puede ser WINDOWS 95/98/NT/XP, este software consta de dos partes que son:

WINDOWMAKER, es el sistema donde se desarrolla el control y monitoreo, pueden crearse ventanas animadas e interactivas en conexión con elementos de entrada y salida. La Figura 55 muestra la pantalla de Windowmaker.

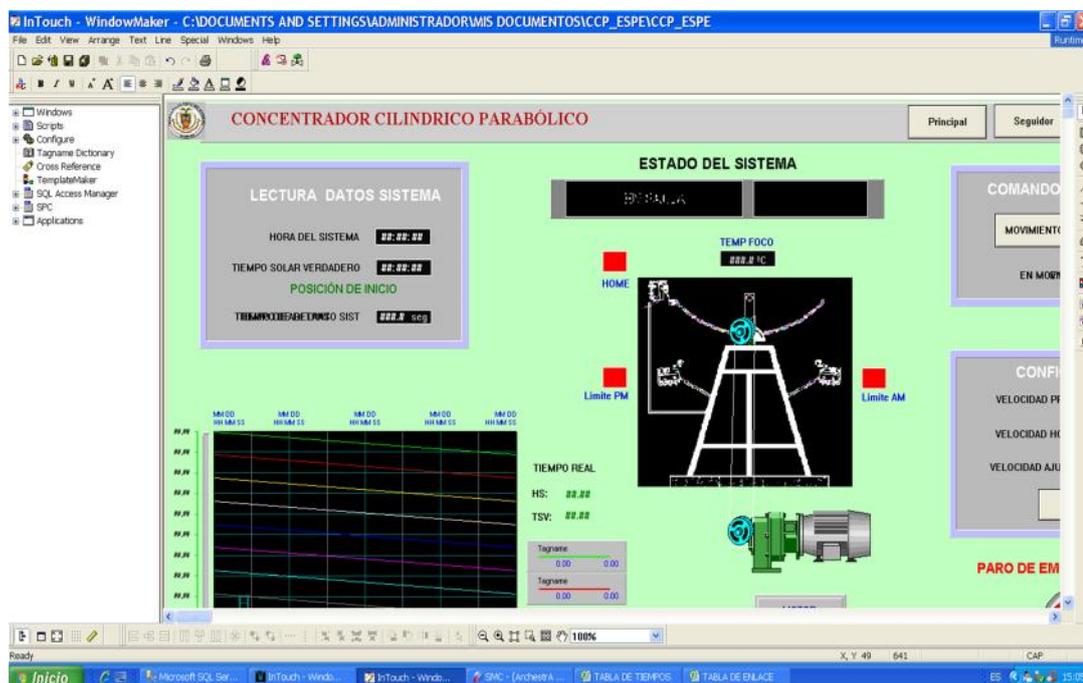


Figura 55: Pantalla de Windowmaker aplicada al concentrador Cilíndrico Parabólico

WINDOWVIEWER, es el programa donde se corre la aplicación denominado Runtime, es un programa de usuario, donde éste, a través de la figuras representadas en la pantalla puede interactuar con el sistema constituyendo así el Scada o el HMI, el monitoreo así, es en tiempo real del sistema. La figura 56 muestra la aplicación de Windowviewer.

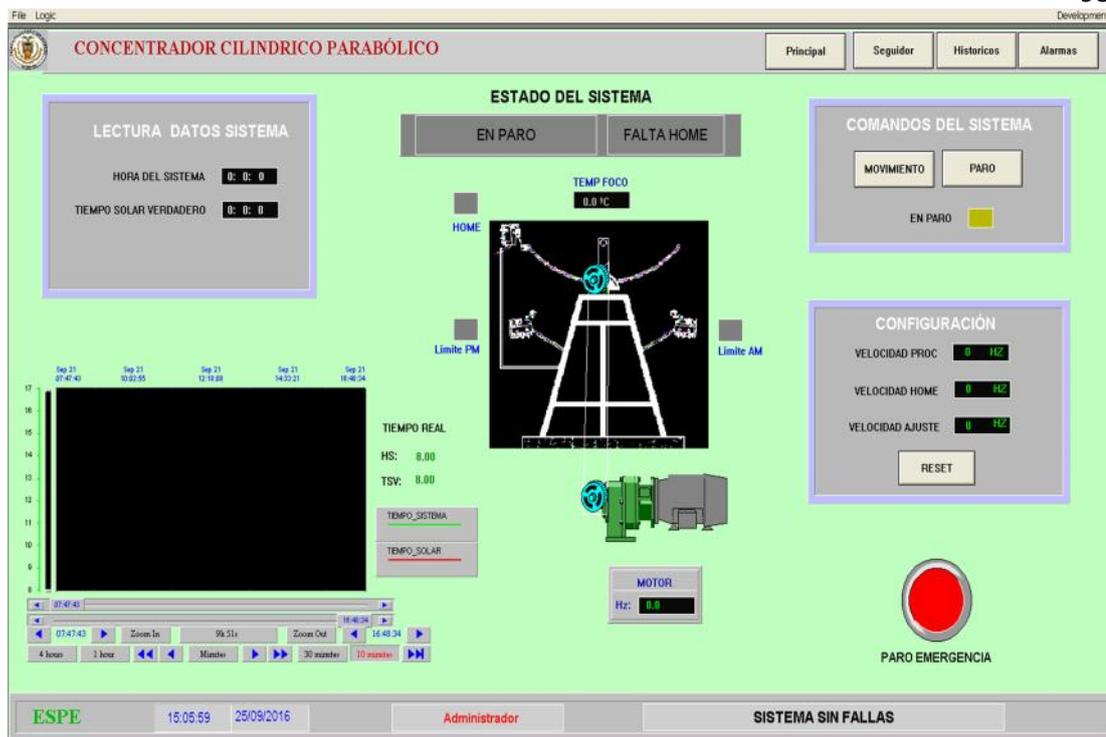


Figura 56: Pantalla de Windowviever aplicada al concentrador Cilíndrico Parabólico

Los datos que arroja el PLC y que son necesario procesar, para ser mostrados en la interfaz gráfica, son almacenados en un programa denominado System Management Console, que se convierte el enlace entre el Intouch y el Programa del PLC.

Este Programa se muestra en la pantalla como lo enseña la figura 57

La tabla 14 presenta las referencias en tienen el PLC guardadas en memoria como números Flotantes o Enteros, banderas, asignados respectivamente a variables del tipo salida analógico o digital, y entrada analógica y digital, esta información se procesa en el Intouch para presentar en el HMI.

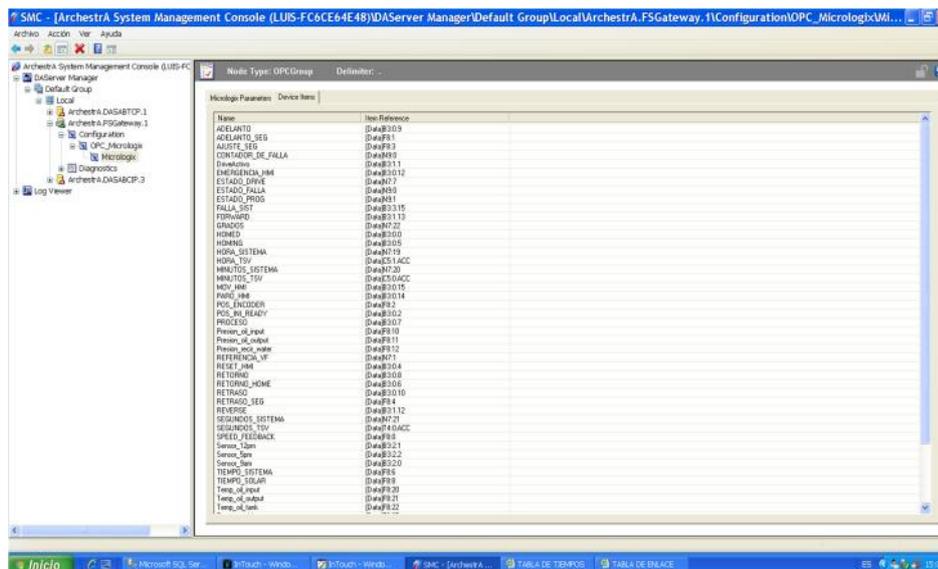


Figura 57: Pantalla de System Management Console como enlace entre las variables del Intouch y las del PLC

Tabla 14

Variables utilizadas en el Intouch y referenciadas a las variables del PLC

1	NOMBRE	REFERENCIA		NOMBRE	REFERENCIA
2	ADELANTO	"[Data]B3:0.9"		POS_INI_READY	"[Data]B3:0.2"
3	ADELANTO_SEG	"[Data]F8:1"		PROCESO	"[Data]B3:0.7"
4	AJUSTE_SEG	"[Data]F8:3"		REFERENCIA_VF	"[Data]N7:1"
5	CONTADOR_DE_FALLA	"[Data]N9:0"		RESET_HMI	"[Data]B3:0.4"
6	DriveActivo	"[Data]B3:1.1"		RETORNO	"[Data]B3:0.8"
7	EMERGENCIA_HMI	"[Data]B3:0.12"		RETORNO_HOME	"[Data]B3:0.6"
8	ESTADO_DRIVE	"[Data]N7:7"		RETRASO	"[Data]B3:0.10"
9	ESTADO_FALLA	"[Data]N9:0"		RETRASO_SEG	"[Data]F8:4"
10	ESTADO_PROG	"[Data]N9:1"		REVERSE	"[Data]B3:1.12"
11	FALLA_SIST	"[Data]B3:3.15"		SEGUNDOS_SISTEMA	"[Data]N7:21"
12	FORWARD	"[Data]B3:1.13"		SEGUNDOS_TSV	"[Data]T4:0.ACC"
13	GRADOS	"[Data]N7:22"		SPEED_FEEDBACK	"[Data]F8:0"
14	HOMED	"[Data]B3:0.0"		Sensor_12pm	"[Data]B3:2.1"
15	HOMING	"[Data]B3:0.5"		Sensor_5pm	"[Data]B3:2.2"
16	HORA_SISTEMA	"[Data]N7:19"		Sensor_9am	"[Data]B3:2.0"
17	HORA_TSV	"[Data]C5:1.ACC"		TIEMPO_SISTEMA	"[Data]F8:6"
18	MINUTOS_SISTEMA	"[Data]N7:20"		TIEMPO_SOLAR	"[Data]F8:8"
19	MINUTOS_TSV	"[Data]C5:0.ACC"		VEL_HOME_HZ	"[Data]N7:2"
20	MOV_HMI	"[Data]B3:0.15"		VEL_PROG_HZ	"[Data]N7:3"
21	PARO_HMI	"[Data]B3:0.14"		VEL_RET_HZ	"[Data]N7:4"
22	POS_ENCODER	"[Data]F8:2"		start	"[Data]B3:1.15"

La metodología para desarrollar la interfaz gráfica en su proceso de control y Monitoreo ha sido:

- Monitoreo de las condiciones del sistema y de sus parámetros críticos

- Establecimiento de consignas para los algoritmos desarrollados en el control local y almacenamiento de los mismos en el programa enlace.
- Establecimiento de secuencia de operaciones en el sistema
- Evaluación de operaciones en el sistema
- Modelamiento del comportamiento del sistema mediante gráficos en la pantalla de la Interfaz gráfica
- Detección, proceso y visualización de fallas en el sistema

La figura 58 muestra la interfaz gráfica en pleno funcionamiento, esta interface muestra:

- En el lado superior izquierdo está un cuadro con El tiempo solar verdadero y el tiempo del sistema
- En el lado inferior izquierdo está un gráfico de los datos históricos del TSV y el Tiempo representadas como curvas en el eje Y, y en el eje X se muestra el tiempo de la hora civil
- En la parte central un cuadro con el estado del Sistema en el cual se muestra

Si el sistema está en PROCESO, HOME, FALLA, además si está en Proceso o Listo para arrancar una vez que está en HOME

- En el centro se observa un gráfico donde se encuentra la figura del colector cilindro parabólico con sus sensores, marcados en cuadros, los mismos que cambian de color cuando son accionados.
- En la parte inferior central, está el motoreductor que se pone en verde cuando está en movimiento o gris cuando está en paro.
- En el lado superior derecho, un cuadro de comandos mediante el cual al accionar las teclas se puede parar o poner en funcionamiento

el motor. Y una pantalla del estado del motor que indica cual es la acción realizada.

- Un cuadro ubicado en la parte central derecha que indica la velocidad de trabajo, tanto en proceso en HOME o velocidad de ajuste cuando el sistema está atrasado, además de un botón de Reset del sistema que borra variables reinicia el proceso, realizando la primera subrutina que es buscar el HOME.
- En la esquina inferior derecha, se tiene un botón de PARO DE EMERGENCIA, este botón es un paro manual del sistema donde manda a borrar las variables, detener el sistema, e ingresa a la subrutina de FALLAS, es este caso, es necesario reiniciar el proceso con un RESET.
- En la Periferia superior , un cuadro de acciones que permite migrar entre diferentes procesos del concentrador cilindro parabólico, aplicado a otras tesis, en el caso de este trabajo solo se utiliza la pantalla que dice SEGUIDOR
- En la Periferia inferior, se observa un reloj de hora y dato civil, la palabra Administrador y un cuadro donde se identifica el tipo de falla producida.

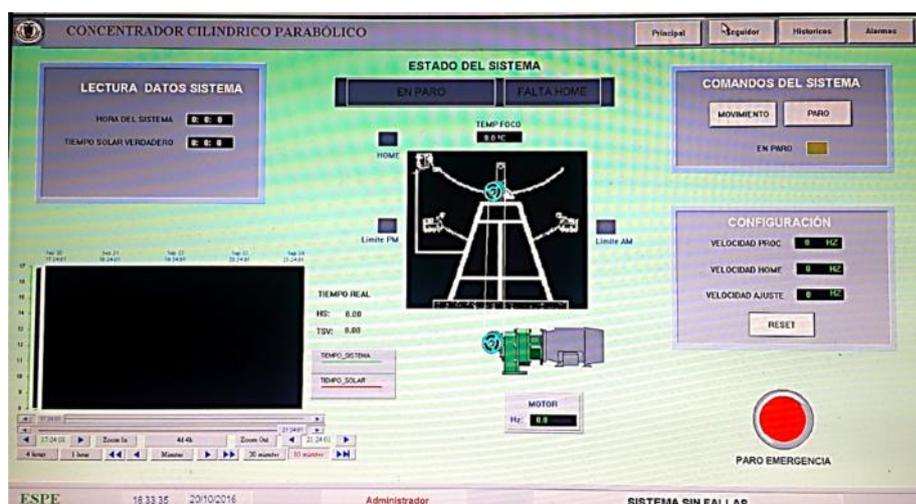


Figura 58: Interfaz Gráfica del Movimiento del Colector Cilíndrico

Parabólico

CAPÍTULO 4

ENSAYOS DEL SEGUIDOR SOLAR

En este capítulo se desarrolla el análisis referente al equipo construido que permitirá verificar la calidad de la instalación y la verificación del funcionamiento de todo el sistema con la precisión que se requiere para dar seguimiento al sol.

4.1 PROTOCOLO DE PRUEBAS DE LA INSTALACIÓN DEL SISTEMA

El protocolo de pruebas realizado permitió verificar el estado normal de los componentes del sistema.

4.1.1 ESTADO DE LA PARTE MECÁNICA DEL SISTEMA

La parte mecánica comprende el CCP y el motoreductor acoplados a través de la polea, para un correcto funcionamiento se verificó lo siguiente:

- La parte mecánica debe del CCP debe estar balanceada, para no tener un excesivo torque en su eje, se procedió a engrasar el sistema de chumaceras, se eliminó un rozamiento excesivo en uno de los extremos del eje, luego se desacopló la polea se midió el torque, el mismo que estaba en 10 Nm.
- Se verificó el estado de la banda que este lo suficientemente tensa para que no patine sobre las poleas.
- Se verificó la temperatura del motoreductor en sus 4 etapas y el motor, observándose que la temperatura más alta la tiene la primera etapa de reducción llegando hasta 80° centígrados, esta temperatura se transmite al motor el mismo que ha llegado hasta 64° centígrados, las otras tres etapas de reducción están bajo los 50° centígrados. Verificando la temperatura en manuales se observa que las etapas de

reducción pueden llegar hasta 130°C de temperatura, se ha verificado el aceite del reductor y está en los niveles adecuados.

- El voltaje del motor es 218 V entre fases y la corriente por cada fase es 0,23 amp, lo que indica que no está funcionando a plena carga.

4.1.2 ESTADO DE LA PARTE ELÉCTRICA DEL SISTEMA

En este proceso se verificó corrientes y voltajes de entrada al tablero, los mismos que se mantienen dentro de los parámetros adecuados según estudio de carga expuesto en el capítulo anterior. Los voltajes del sistema fueron 218 vol. Entre fases y la corriente por cada fase estuvo en la fase R 2.5 A, en la fase S 1,8 A. y en la Fase T 1,8 A, mientras se mantuvo encendidas todos las cargas posibles. No se consideró las cargas futuras.

4.2 ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA ELÉCTRICO Y MECÁNICO

Se ha considerado el funcionamiento del CCP en tres estados, que son:

4.2.1 ESTADO DE ARRANQUE DEL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA

El estado de arranque del sistema corresponde al encendido del tablero de control, a partir de que el mismo haya estado sin energía anteriormente por alguna causa provocada o por disparo de sus protecciones, en tal caso se hará una descripción de los pasos realizados para el encendido.

- Para encender el sistema se procede a verificar el estado del disyuntor principal que se encuentre en estado de ON, luego se procede a energizar el tablero a través del Interruptor de potencia ubicado al frente del tablero.
- Se verifica que se encienda las luces correspondientes a las tres fases de alimentación.
- Se observa que se enciende el PLC colocando sus luces en encendido y en funcionamiento.
- Se observa que se enciende el Driver indicando una frecuencia de 0.0 Hz.

- Luego de 1 minuto de espera, se observa que el Driver cambia su velocidad a 60 Hz y se pone en modo de retorno.
- El CCP al haber perdido su posición de hora por haber estado apagado, inicia un proceso de retorno donde si el sistema está entre el sensor de HOME (12h00) y el sensor de la mañana, en su proceso de retorno llegará luego de un tiempo hasta el sensor de la mañana, el cual se activa y le indica al PLC que se encuentra el CCP ubicado antes de las 12h00, entonces se inicia un proceso de avance en adelante, hasta encontrar el sensor HOME y resetea el reloj del sistema a las 12h00, a partir de este valor el CCP retorna hasta la posición de 9h00 para esperar que el TSV se iguale a este valor y arrancar el sistema en el proceso de seguimiento solar, mientras tanto el Driver pone a su salida 0.0 Hz. Este proceso fue verificado con un correcto funcionamiento.
- Si el CCP se encuentra entre el sensor de la tarde y el sensor HOME entonces en su proceso de retorno llega a HOME, resetea el reloj del sistema a las 12h00 y a partir de este valor el CCP retorna hasta la posición de 9h00 para esperar que el TSV se iguale a este valor y arrancar el sistema en el proceso de seguimiento solar, mientras tanto el Driver pone a su salida 0.0 Hz. Este proceso fue verificado con un correcto funcionamiento.

4.2.2 ESTADO NORMAL DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA.

Una vez que el sistema se posicionó a las 9h00, el sistema espera que el TSV llegue también a la posición de las 9h00, al ser los dos tiempo iguales arranca el sistema, llevando su velocidad a 36 Hz que es la velocidad ajustada para el seguimiento solar, así este proceso llega hasta las 16h00, donde el sistema se para, espera 1 minuto, e inicia el proceso de retorno, al pasar por HOME, resetea el valor de posición del Encoder, y con el programa del PLC lo posiciona a las 9h00, para esperar el nuevo día. Este proceso fue verificado en su funcionamiento.

4.2.3 ESTADO DE FALLA DEL SISTEMA

Este estado se ha observado, se genera por múltiples causas, pero principalmente, puede producirse por dos situaciones: manipulación errónea o diferencia de 2 horas entre el TSV y el tiempo del sistema.

La manipulación errónea puede ser debido a que dentro de un proceso coherente y secuencial de funcionamiento, se produce estados inesperados como por ejemplo, que el sistema esté en el proceso normal de seguimiento y se enciende el sensor de la mañana, o que se enciendan simultáneamente dos sensores, entonces el sistema reconoce como falla, se resetea el sistema y entra en el proceso de arranque.

Otra situación que se verificó, fue que dentro del proceso de seguimiento no se permitió que el CCP se mueva, cuando la diferencia de tiempo entre el CCP y el tiempo del sistema fue igual a dos horas, se interpretó como una falla, el sistema se resetea y entra en el proceso de arranque.

Si en el proceso de seguimiento o en el proceso de retorno el sistema dura más de ocho horas encendido, indica que no ha llegado a ninguno de los sensores y también se interpreta como falla y se produce el Paro del sistema, hasta que se verifique el estado de falla.

4.3 TRANSFERENCIA DE DATOS, PROCESAMIENTO Y CONTROL DE PARÁMETROS

Se ha configurado una pequeña red Ethernet entre el PLC y la computadora que tiene el HMI, denominada Control Solutions, se verifica el correcto funcionamiento del sistema en el proceso de interconexión entre el programa RS Logix 500 que el que permite visualizar el funcionamiento del Programa del PLC en tiempo real, además en el programa INTOUCH del interface Hombre-máquina, se verifica la observación y el control de los diferentes estados y parámetros del PLC que han sido determinados realizarlos a través del INTOUCH, a través de la pantalla RUNTIME del programa Windowiever,

En la pantalla RUNTIME se puede observar el comportamiento del seguidor solar respecto del TSV en un gráfico en el HMI, sin embargo,

además se ha procedido a obtener los registros del INTOUCH y llevarlos a una base de datos en SQL Server, que toma registros cada 10 minutos de los parámetros determinados como son: Tiempo Civil, TSV, Tiempo del sistema, de tal forma que se ha generado tablas de datos que presentan el comportamiento del sistema.

4.4 VISUALIZACIÓN DE RESULTADOS A TRAVÉS DEL INTERFACE HOMBRE MÁQUINA

La pantalla de visualización de interface Hombre- Máquina es la que se muestra en la figura 58, como se observa en el centro superior se visualiza un rótulo de estado del sistema que indica si está en estado de SEGUIMIENTO, RETORNO, EN PARO, (si está en este estado indica porque está parado el sistema), y en FALLA. En el lado superior izquierdo se visualiza la LECTURA DE DATOS DEL SISTEMA que no es más que la visualización del TSV y el Tiempo del sistema.

En la parte inferior izquierda se puede visualizar el trazado que va realizando en tiempo real el TSV y la Hora del Sistema, así como mediante las teclas inferiores se puede acceder a los registros gráficos históricos del sistema.

En la parte central se observa la figura del CCP, con los tres sensores externos tipo fin de carrera que posee el sistema, si estos se accionan los recuadros respectivos cambian de color a rojo.

La figura de motor tiene dos estados de color, si está en paro el color del motor es gris, y si está en movimiento, el color del motor es verde.

En la parte superior derecha se observa 4 recuadros, tres de los cuales son para futuras aplicaciones y solo el que dice seguidor, permite ingresar al HMI del controlador del CCP.

En el Recuadro COMANDOS DEL SISTEMA se puede en forma manual permitir que el sistema se pare o se ponga en movimiento con un indicador del estado del mismo.

En la parte de Configuración se puede observar y cambiar la velocidad de cuando está en proceso de seguimiento, de ARRANQUE o haciendo HOME, y la velocidad de ajuste que permite alcanzar el TSV en caso de que el Tiempo del Sistema de haya retrasado. Estos tiempos se pueden cambiar siempre y cuando se encuentre en proceso de HOME o arranque del sistema. Existe una tecla virtual de RESET, si se presiona esta tecla, el sistema entra en proceso de búsqueda de HOME, es decir en posicionarse a las 9h00 esperando un nuevo día.

En la parte inferior se puede observar un botón virtual de paro de emergencia, este botón tiene enclavamiento, de tal forma que si está activo cambia de color a verde e indica que está en PARO DE EMERGENCIA ACTIVO habrá que presionar con el cursor otra vez para salir del desbloqueo de emergencia.

En la parte inferior de la pantalla se hace referencia, a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, la hora civil y la fecha, la palabra ADMINISTRADOR e indica el estado del SISTEMA SIN FALLAS o cuando esta con falla, el tipo de falla producida.

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 TABULACIÓN DE DATOS OBTENIDOS

Los datos obtenidos han sido almacenados creando una base en SQL Server, estos valores que recoge el Intouch, se procesan y se envían a la base de datos que se muestra en la figura 59. Como se puede observar, se recogen datos que servirán para otras tesis como son temperatura, presión, etc., y para este trabajo se recogen datos que se observan al lado derecho como son: La hora del sistema y del TSV para una fecha determinada.

The screenshot displays the Microsoft SQL Server Enterprise Manager interface. The main window shows a table named 'dbo.Table_data' with the following columns: 'Presion_of_input', 'Presion_of_out...', 'Presion_rect...', 'Temp_of_input', 'Temp_of_output', 'Temp_of_tank', 'Temp_outside', 'Temp_tube_absorver', 'Temp_water_e...', 'casa_pasiva', 'Tiempo_Sistema', and 'Tiempo'. The table contains 30 rows of data, with the first row starting at 0,2948597 and the last row at 0,3221616. The 'Tiempo_Sistema' column shows timestamps ranging from 12,1636 to 15,3302. The 'Tiempo' column shows timestamps ranging from 12,1636 to 15,3302.

Presion_of_input	Presion_of_out...	Presion_rect...	Temp_of_input	Temp_of_output	Temp_of_tank	Temp_outside	Temp_tube_absorver	Temp_water_e...	casa_pasiva	Tiempo_Sistema	Tiempo
0,2948597	0,163811	-33,8870277	25,5	24,6	29	22,4	27,4	28,1	0	NEEL	NEEL
0,2948597	0,1583506	-33,8870277	24,9	24,1	28,4	26,3	27,2	27,6	0	NEEL	NEEL
0,2948597	0,1583506	-33,8815651	23,7	24	28	23,5	27,6	27,1	0	NEEL	NEEL
0,2948597	0,1583506	-33,8815651	24,4	24	27,8	24,6	27,2	27,4	0	NEEL	NEEL
0,3003201	0,1583506	-33,8815651	25,1	24	27,7	23,6	26,9	26,7	0	NEEL	NEEL
0,3057804	0,1682713	-33,8815651	24,6	24	27,4	25,7	26	26,5	0	NEEL	NEEL
0,3057804	0,1682713	-33,8815651	23,3	23,8	28,8	24,4	26,3	26,4	0	NEEL	NEEL
0,3003201	0,163811	-33,8761963	24,9	23,9	28,6	25,1	27,1	26,4	0	NEEL	NEEL
0,3057804	0,1682713	-33,8815651	24,3	24,1	27,9	25,4	26,2	27,3	0	NEEL	NEEL
0,3057804	0,1682713	-33,8815651	24	24	27,6	26,2	27,7	26,7	0	NEEL	NEEL
0,3167812	0,1801921	-33,8815651	24,2	24,4	28,4	25,7	28,5	27,2	0	NEEL	NEEL
0,3167812	0,1747317	-33,8815651	24,9	24,4	27,8	25	30,3	27,1	0	12,1879978	12,1836
0,3167812	0,1896524	-33,8815651	25,6	24,6	27,9	24,6	31,4	26,4	0	12,3284957	12,3306
0,3278219	0,1911128	-33,8815651	25,6	25	27,9	25,3	31	26,6	0	12,5161743	12,4972
0,3338823	0,2020395	-33,8815651	25,3	24,8	27,7	27	34,2	27,3	0	12,6586213	12,4641
0,344903	0,2129542	-33,8761963	25,4	25	26,3	27,9	35,4	27,2	0	12,8677921	12,8306
0,3549237	0,2194146	-33,8815651	25,4	24,6	25,9	27,4	36,4	27,8	0	12,9849977	12,9972
0,3684445	0,2347957	-33,8815651	27,2	24,8	25,8	27,9	38,2	26,2	0	13,1725273	13,1638
0,3713048	0,2347957	-33,8870277	27	25,2	25,7	28,9	40,1	25,7	0	13,3131723	13,3306
0,3767652	0,2511768	-33,8815651	28	25,6	26,3	28,9	42,4	25,8	0	13,5587038	13,4972
0,3988667	0,2675579	-33,8870277	26,6	25,2	25,1	30,5	46,1	26,4	0	13,6647911	13,6636
0,4095274	0,2794786	-33,8870277	26,2	25,1	25,1	29,8	47,7	24,6	0	13,8288794	13,8302
0,4149877	0,283939	-33,8870277	26	25	24,5	28,7	48,9	24,9	0	13,9929676	13,9965
0,4259885	0,2948597	-33,8870277	25	24,9	24,7	30,2	49,7	26,1	0	14,1570559	14,1638
0,4149877	0,283939	-33,8870277	25,7	24,7	24,8	29,6	50	25,3	0	14,3211441	14,3302
0,404867	0,2730183	-33,8924866	26,4	25	24,3	29	51,1	23,6	0	14,5086727	14,4965
0,3878859	0,2629975	-33,8870277	26,4	25,2	24,6	28,9	51,5	24,3	0	14,6493206	14,6632
0,3767652	0,2457164	-33,8924866	26,7	24,9	25,3	29,9	50,2	23,8	0	14,8134079	14,83
0,3549237	0,2293353	-33,8924866	27,4	25	25,4	30,2	47,9	25,3	0	15,0089375	14,9965
0,344903	0,2194146	-33,8870277	26,7	25,1	26,3	29,7	45,1	25,5	0	15,188467	15,1832
0,3221616	0,1911128	-33,8870277	26,3	25,3	26,5	29,2	42,2	26,8	0	15,329114	15,3302

Figura 59: Pantalla que muestra la base de datos SQL Server donde se ha almacenado los valores del TSV y el Tiempo del sistema

El proceso de almacenamiento de datos se lo realizó por 4 días y se muestran en las tablas procesadas que se muestran a continuación:

Tabla 15

Valores del TSV y el tiempo del sistema para el 19 de Septiembre del 2016

ITEM	HORA	FECHA	TEMP TUBO	TIEMPO SISTEMA	TIEMPO SOLAR	DIFERENCIA TIEMPO
			CENTIGRADOS	(HORA EN DECIMALES)	(HORA EN DECIMALES)	(MINUTOS EN DECIMAL)
1124	12:00:00	19/09/2016	30,3	12,1879978	12,1638889	1,446534
1125	12:10:00	19/09/2016	31,4	12,3286457	12,3305559	-0,114612
1126	12:20:00	19/09/2016	31	12,5161743	12,4972229	1,137084
1127	12:30:00	19/09/2016	34,2	12,6568213	12,6641665	-0,440712
1128	12:40:00	19/09/2016	35,4	12,8677921	12,8305559	2,234172
1129	12:50:00	19/09/2016	36,4	12,9849977	12,9972229	-0,733512
1130	13:00:00	19/09/2016	38,2	13,1725273	13,1638889	0,518304
1131	13:10:00	19/09/2016	40,1	13,3131733	13,3305559	-1,042956
1132	13:20:00	19/09/2016	42,4	13,5007038	13,4972229	0,208854
1133	13:30:00	19/09/2016	46,1	13,6647911	13,66361	0,070866
1134	13:40:00	19/09/2016	47,7	13,8288794	13,8302774	-0,08388
1135	13:50:00	19/09/2016	48,9	13,9929676	13,9969444	-0,238608
1136	14:00:00	19/09/2016	49,7	14,1570559	14,1638889	-0,40998
1137	14:10:00	19/09/2016	50	14,3211441	14,3302774	-0,547998
1138	14:20:00	19/09/2016	51,1	14,5086727	14,4969444	0,703698
1139	14:30:00	19/09/2016	51,5	14,6493206	14,6633329	-0,840738
1140	14:40:00	19/09/2016	50,2	14,8134079	14,83	-0,995526
1141	14:50:00	19/09/2016	47,9	15,0009375	14,9969444	0,239586
1142	15:00:00	19/09/2016	45,1	15,188467	15,1633329	1,508046
1143	15:10:00	19/09/2016	42,2	15,329114	15,3302774	-0,069804
1144	15:20:00	19/09/2016	41,1	15,4932022	15,4969444	-0,224532
1145	15:30:00	19/09/2016	41,5	15,65729	15,66361	-0,3792
1146	15:40:00	19/09/2016	41,4	15,8213787	15,83	-0,517278
1147	15:50:00	19/09/2016	39,8	16,0089073	15,9574995	3,084468
1148	16:00:00	19/09/2016	39,2	16,0089073	15,9574995	3,084468

En la tabla cada columna representa:

Columna 1. Numeral del dato obtenido

Columna 2: Hora del tiempo civil obtenido

Columna 3: Fecha del Dato obtenido

Columna 4: Temperatura del tubo absorbedor, que se utiliza como referencia del calentamiento producido por la concentración de rayos solares, se debe considerar que cuando baja la temperatura aunque este en seguimiento, se debe a se interpusieron nubes y no hubo radicación solar directa.

Columna 5; Tiempo del sistema expresado en Horas con decimales

Columna 6; Tiempo del sistema expresado en Horas con decimales

Columna 7: Diferencia de Tiempo entre el TSV y el Tiempo del sistema expresado en minutos con decimales.

Como se puede observar en el proceso de seguimiento solar, el Tiempo solar verdadero es la consigna, y la columna 7 es la diferencia con respecto al tiempo del sistema.

En el eje X se observa el Tiempo civil, y en eje Y se observa la hora procesada desde las 12h00 el comportamiento del TSV y el tiempo del sistema

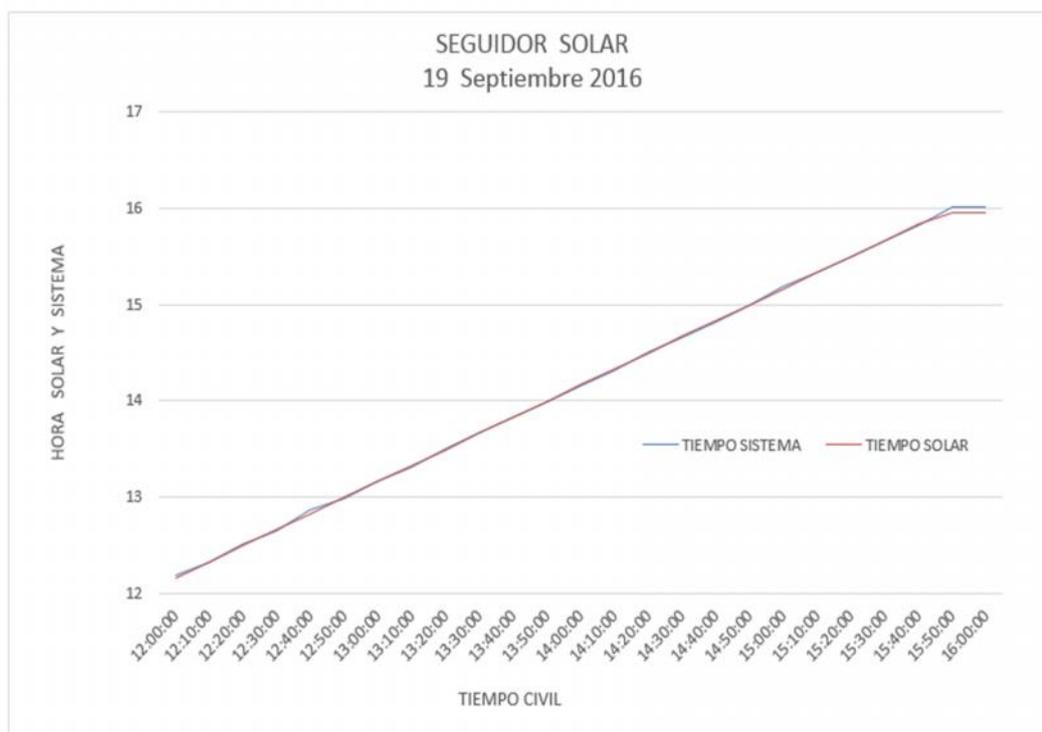


FIGURA 60: Gráfico del seguimiento del Tiempo TSV y Tiempo del sistema para el 19 de Septiembre del 2016

Como se puede observar el TSV y el Tiempo del Sistema coinciden en su trayectoria y se encuentran graficados en el eje Y, en el eje X se encuentra graficado el Tiempo Civil, el proceso de seguimiento arrancó a las 12H00 PM y terminó a las 4 PM,

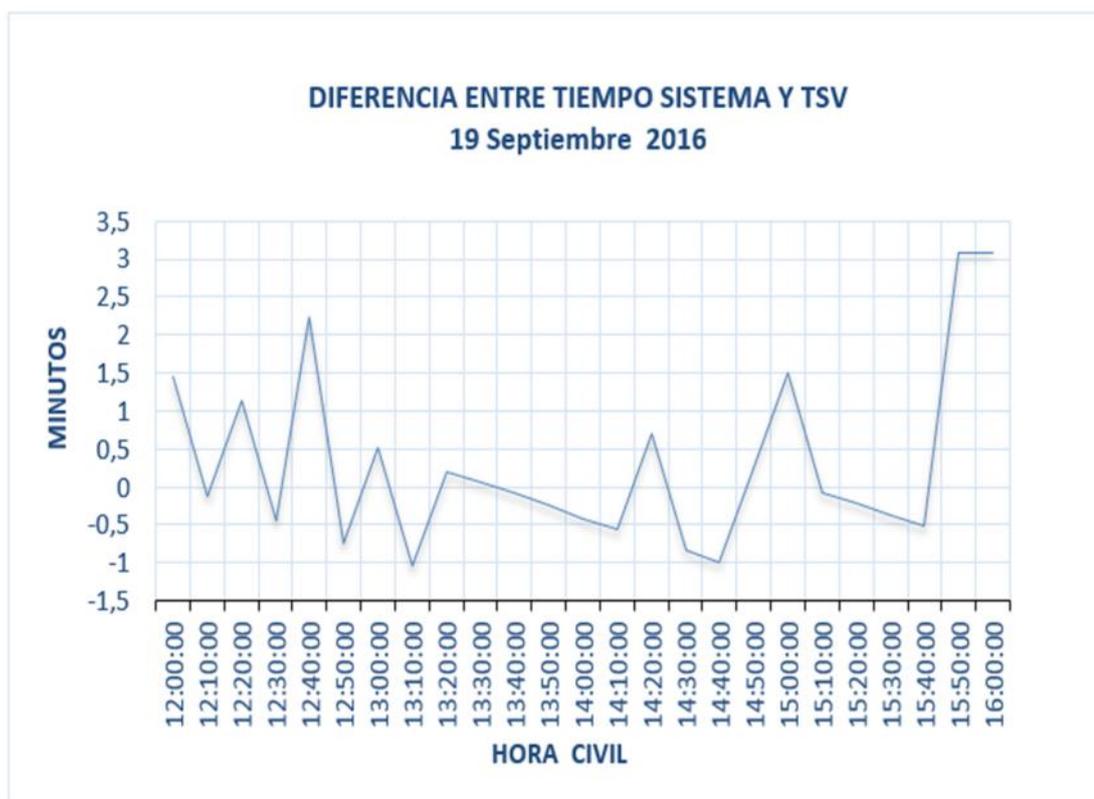


FIGURA 61: Gráfico del error producido entre el TSV y el Tiempo del sistema para el 19 de Septiembre del 2016.

Como se puede observar en el proceso de seguimiento solar, el Tiempo solar verdadero es la consigna y se encuentra en la línea 0, en la columna 7 está la diferencia entre el TSV y el tiempo del sistema, determinándose este como un error de seguimiento.

Para el Día 20 de Septiembre del 2016 se obtuvieron los siguientes datos.

Tabla 16

Valores del TSV y el tiempo del sistema para el 20 de Septiembre del 2016

ITEM	HORA	FECHA	TEMP TUBO	TIEMPO SISTEMA	TIEMPO SOLAR	DIFERENCIA TIEMPO
			CENTIGRADOS	(HORA EN DECIMALES)	(HORA EN DECIMALES)	(MINUTOS EN DECIMAL)
1154	9:00:00	20/09/2016	65	9,140647	9,161666	-1,26114
1155	9:10:00	20/09/2016	59,3	9,304735	9,3136105	-0,53253
1156	9:20:00	20/09/2016	51,5	9,468823	9,465555	0,19608
1157	9:30:00	20/09/2016	52,9	9,586029	9,6325	-2,78826
1158	9:40:00	20/09/2016	55,7	9,773559	9,798889	-1,5198
1159	9:50:00	20/09/2016	56,5	9,961087	10,0158329	-3,284754
1160	10:00:00	20/09/2016	68,1	10,1720581	10,1825	-0,626514
1161	10:10:00	20/09/2016	69,1	10,312705	10,3488884	-2,171004
1162	10:20:00	20/09/2016	70,3	10,4299107	10,5158329	-5,155332
1163	10:30:00	20/09/2016	71,6	10,5236759	10,6825	-9,529446
1164	10:40:00	20/09/2016	71,2	10,8518515	10,8491659	0,161136
1165	10:50:00	20/09/2016	72,2	10,969058	11,0155554	-2,789844
1166	11:00:00	20/09/2016	70,9	11,0628223	11,1822224	-7,164006
1167	11:10:00	20/09/2016	60,9	11,2972336	11,3488884	-3,099288
1168	11:20:00	20/09/2016	51,8	11,4613218	11,5155554	-3,254016
1169	11:30:00	20/09/2016	46,6	11,6488514	11,6819448	-1,985604
1170	11:40:00	20/09/2016	48,3	11,7894983	11,8486109	-3,546756
1171	11:50:00	20/09/2016	47,8	12,0004692	12,0152779	-0,888522
1172	12:00:00	20/09/2016	48,3	12,23488	12,1819448	3,176112
1173	12:10:00	20/09/2016	49	12,3052044	12,3486109	-2,60439
1174	12:20:00	20/09/2016	49,7	12,5161743	12,5152779	0,053784
1175	12:30:00	20/09/2016	47,3	12,60994	12,6819448	-4,320288
1176	12:40:00	20/09/2016	46,4	12,8443508	12,8486109	-0,255606
1177	12:50:00	20/09/2016	49	13,0318794	13,0152779	0,99609
1178	13:00:00	20/09/2016	52,5	13,1725273	13,1819448	-0,56505
1179	13:10:00	20/09/2016	53,4	13,3131733	13,3483334	-2,109606
1180	13:20:00	20/09/2016	54,2	13,5241451	13,515	0,548706
1181	13:30:00	20/09/2016	55,3	13,805439	13,6819448	7,409652
1182	13:40:00	20/09/2016	57,3	13,875762	13,8486109	1,629066
1183	13:50:00	20/09/2016	58,1	13,946085	14,0152779	-4,151574
1184	14:00:00	20/09/2016	59,9	14,1336145	14,1816673	-2,883168
1185	14:10:00	20/09/2016	60	14,3445854	14,3483334	-0,22488
1186	14:20:00	20/09/2016	53,2	14,532114	14,515	1,02684
1187	14:30:00	20/09/2016	56,2	14,6727619	14,6816673	-0,534324
1188	14:40:00	20/09/2016	57,9	14,9071732	14,8483334	3,530388
1189	14:50:00	20/09/2016	60,5	15,0243788	15,015	0,562728
1190	15:00:00	20/09/2016	59,7	15,188467	15,1816673	0,407982
1191	15:10:00	20/09/2016	61,4	15,3525553	15,3483334	0,253314
1192	15:20:00	20/09/2016	61,3	15,4932022	15,5147219	-1,291182
1193	15:30:00	20/09/2016	62,9	15,6338491	15,6816673	-2,869092
1194	15:40:00	20/09/2016	63,9	15,8682613	15,8483334	1,195674
1195	15:50:00	20/09/2016	62,7	15,9620247	16,0147228	-3,161886

Los gráficos obtenidos para este día son:

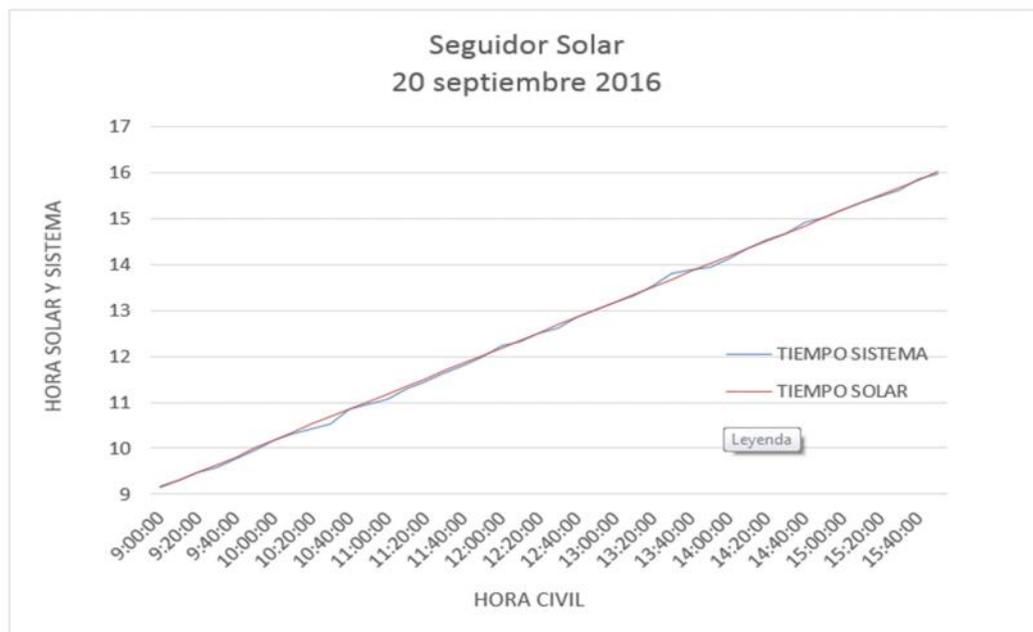


FIGURA 62: Gráfico del seguimiento del Tiempo TSV y Tiempo del sistema para el 20 de Septiembre del 2016

Como se observa el proceso de seguimiento se realizó durante el tiempo programado por el sistema, es decir desde las 9H00 hasta las 16H00 del TSV que mantiene un adelanto respecto del Tiempo Civil, el proceso de seguimiento se encuentra graficado en la figura 62.



FIGURA 63: Gráfico del error producido entre el TSV y el Tiempo del sistema para el 20 de Septiembre del 2016.

El Tiempo solar verdadero es la consigna y se encuentra en la línea 0, en la columna 7 está la diferencia entre el TSV y el tiempo del sistema, determinándose este como un error de seguimiento.

Para el Día 21 de Septiembre del 2016 se obtuvieron los siguientes datos.

Tabla 17

Valores del TSV y el tiempo del sistema para el 21 de Septiembre del 2016

ITEM	HORA	FECHA	TEMP TUBO	TIEMPO SISTEMA	TIEMPO SOLAR	DIFERENCIA TIEMPO
			CENTIGRADOS	(HORA EN DECIMALES)	(HORA EN DECIMALES)	(MINUTOS EN DECIMAL)
1207	8:50:00	21/09/2016	48	9	9,013056	-0,78336
1208	9:00:00	21/09/2016	46,8	9,023441	9,179167	-9,34356
1209	9:10:00	21/09/2016	48,4	9,3281765	9,34611	-1,07601
1210	9:20:00	21/09/2016	54,2	9,515705	9,513056	0,15894
1211	9:30:00	21/09/2016	57,5	9,656353	9,646111	0,61452
1212	9:40:00	21/09/2016	55,4	9,797	9,779722	1,03668
1213	9:50:00	21/09/2016	57	9,890764	9,946389	-3,3375
1214	10:00:00	21/09/2016	51,7	10,1017342	10,1130562	-0,67932
1215	10:10:00	21/09/2016	52,8	10,1720581	10,2794437	-6,443136
1216	10:20:00	21/09/2016	61,3	10,2189407	10,4461107	-13,6302
1217	10:30:00	21/09/2016	62,2	10,2189407	10,6127777	-23,63022
1218	10:40:00	21/09/2016	62,1	10,2189407	10,7797222	-33,64689
1219	10:50:00	21/09/2016	59,4	10,4767933	10,9461107	-28,159044
1220	11:00:00	21/09/2016	56,6	10,969058	11,1127777	-8,623182
1221	11:10:00	21/09/2016	57,7	11,2503519	11,2791662	-1,728858
1222	11:20:00	21/09/2016	59,6	11,3675575	11,4458332	-4,696542
1223	11:30:00	21/09/2016	59,2	11,5785275	11,6125	-2,03835
1224	11:40:00	21/09/2016	55,9	11,7426157	11,7791662	-2,19303
1225	11:50:00	21/09/2016	46,6	11,8832626	11,9455557	-3,737586
1226	12:00:00	21/09/2016	50,7	9	9,003889	-0,23334
1227	12:10:00	21/09/2016	49,4	12,2817631	12,3102779	-1,710888
1228	12:20:00	21/09/2016	46,8	12,3755274	12,4766665	-6,068346
1229	12:30:00	21/09/2016	50,7	12,5396156	12,6433334	-6,223068
1230	12:40:00	21/09/2016	47,8	12,7974682	12,8102779	-0,768582
1231	12:50:00	21/09/2016	44,8	12,9615564	12,976944	-0,923256
1232	13:00:00	21/09/2016	48,9	13,1022034	13,143611	-2,484456
1233	13:10:00	21/09/2016	41,6	13,3834972	13,3102779	4,393158
1234	13:20:00	21/09/2016	43,4	13,5007038	13,476944	1,425588
1235	13:30:00	21/09/2016	45	13,6647911	13,6433334	1,287462
1236	13:30:00	21/09/2016	44,2	13,6647911	13,643611	1,270806
1237	13:40:00	21/09/2016	41,7	13,805439	13,81	-0,27366
1238	13:50:00	21/09/2016	42,5	13,8992023	13,9766665	-4,647852
1239	14:00:00	21/09/2016	60	14,1336145	14,143055	-0,56643
1240	14:10:00	21/09/2016	49,6	14,25082	14,31	-3,5508
1241	14:20:00	21/09/2016	45,8	14,532114	14,476388	3,34356
1242	14:30:00	21/09/2016	48,9	14,6258793	14,643055	-1,030542
1243	14:40:00	21/09/2016	47,7	14,8134079	14,81	0,204474
1244	14:50:00	21/09/2016	48,2	14,9306145	14,9766665	-2,76312
1245	15:00:00	21/09/2016	46,5	15,258791	15,1427774	6,960816
1246	15:10:00	21/09/2016	45,7	15,258791	15,3097219	-3,055854
1247	15:20:00	21/09/2016	47,5	15,3759956	15,47611	-6,006864
1248	15:20:00	21/09/2016	47,5	15,3759956	15,476388	-6,023544
1249	15:30:00	21/09/2016	44,3	15,5400848	15,6427774	-6,161556
1250	15:50:00	21/09/2016	39,2	15,8917017	15,97611	-5,064498

Los gráficos obtenidos para este día son:

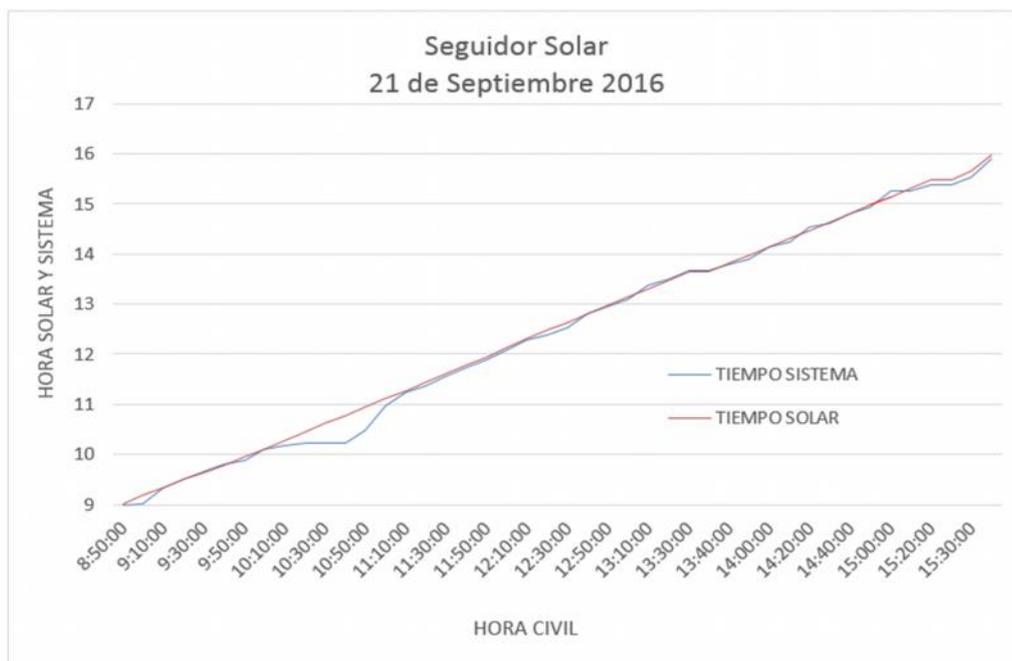


FIGURA 64: Gráfico del seguimiento del Tiempo TSV y Tiempo del sistema para el 21 de Septiembre del 2016

El proceso de seguimiento se realizó durante el tiempo programado por el sistema, es decir desde las 9H00 hasta las 16H00, el proceso de seguimiento se encuentra graficado en la figura 64.



FIGURA 65: Gráfico del error producido entre el TSV y el Tiempo del sistema para el 21 de Septiembre del 2016.

El Tiempo solar verdadero es la consigna y se encuentra en la línea 0, en la columna 7 está la diferencia entre el TSV y el tiempo del sistema, determinándose este como un error de seguimiento.

Durante el proceso de seguimiento, se observa que aproximadamente entre la 10H00 y 11H00, la diferencia respecto de la consigna llegó a superar los 30 minutos, esto responde a una falla en el sistema que se había trabado el eje del espejo reflector, por el rozamiento con un perno y una platina en uno de los extremos, esto ocasionó que el Encoder no varíe su posición, la correa patine sobre la polea, y se produzca esta diferencia en el tiempo de seguimiento, se corrigió la falla y se forzó al sistema a seguir la consigna a partir de las 11H00, a partir del 15H30 se perdió la información entre la computadora y el PLC generando la falla que aparenta que el TSV se vuelve plano. Al igual que el tiempo del sistema.

Para el Día 22 de Septiembre del 2016 se obtuvieron los siguientes datos.

El Tiempo solar verdadero es la consigna y se encuentra en la línea 0, en la columna 7 está la diferencia entre el TSV y el tiempo del sistema, determinándose este como un error de seguimiento.

En este día se observa una oscilación marcada del tiempo del sistema respecto del TSV, este día estuvo marcado por fuertes vientos que marcaban valores exagerados en el tiempo del sistema. Entre la 13H40 y las 14H00, se perdió la comunicación vía WIFI entre el PLC y la computadora registrándose un tiempo plano de funcionamiento, pero luego se observa que se continúa la consigna respectiva.

Tabla 18

Valores del TSV y el tiempo del sistema para el 22 de Septiembre del 2016

ITEM	HORA	FECHA	TEMP TUBO	TIEMPO SISTEMA	TIEMPO SOLAR	DIFERENCIA TIEMPO
			CENTIGRADOS	(HORA EN DECIMALES)	(HORA EN DECIMALES)	(MINUTOS EN DECIMAL)
1252	9:10:00	22/09/2016	57,7	9,18753	9,307778	-7,21488
1253	9:20:00	22/09/2016	56,3	9,351618	9,474722	-7,38624
1254	9:30:00	22/09/2016	55,1	9,562588	9,641389	-4,72806
1255	9:40:00	22/09/2016	57	9,82044	9,808056	0,74304
1256	9:40:00	22/09/2016	56,6	9,82044	9,808333	0,72642
1257	9:50:00	22/09/2016	56,2	9,984529	9,974444	0,6051
1258	10:00:00	22/09/2016	58,4	10,1486168	10,1411114	0,450324
1259	10:10:00	22/09/2016	56,1	10,312705	10,3077784	0,295596
1260	10:20:00	22/09/2016	56,5	10,5002346	10,4747219	1,530762
1261	10:30:00	22/09/2016	58	10,6408815	10,6411114	-0,013794
1262	10:40:00	22/09/2016	52,9	10,8284111	10,8075	1,254666
1263	11:00:00	22/09/2016	55,6	11,180028	11,1411114	2,334996
1264	11:10:00	22/09/2016	48,2	11,2972336	11,3075	-0,615984
1265	11:10:00	22/09/2016	49	11,2972336	11,3077784	-0,632688
1266	11:20:00	22/09/2016	47,8	11,4613218	11,4741659	-0,770646
1267	11:30:00	22/09/2016	46,5	11,62541	11,6408329	-0,925374
1268	11:40:00	22/09/2016	44,8	11,8832626	11,8072224	4,562412
1269	11:50:00	22/09/2016	44,4	11,9535866	11,9744444	-1,251468
1270	12:00:00	22/09/2016	47,2	12,1411161	12,1411114	0,000282
1271	12:10:00	22/09/2016	47,3	12,2817631	12,3072224	-1,527558
1272	12:20:00	22/09/2016	48,5	12,4692917	12,4741659	-0,292452
1273	12:30:00	22/09/2016	52,2	12,7037039	12,6408329	3,77226
1274	12:30:00	22/09/2016	50,5	12,7037039	12,6411114	3,75555
1275	12:40:00	22/09/2016	50	12,8677921	12,8075	3,617526
1276	12:50:00	22/09/2016	51,1	12,9615564	12,9741659	-0,75657
1277	13:00:00	22/09/2016	49,5	13,1959686	13,1405554	3,324792
1278	13:20:00	22/09/2016	43,8	13,4069386	13,275	7,916316
1279	13:30:00	22/09/2016	44,2	13,4069386	13,275	7,916316
1280	13:40:00	22/09/2016	51,3	13,4069386	13,275	7,916316
1281	13:50:00	22/09/2016	46,8	13,5241451	13,5169439	0,432072
1282	14:00:00	22/09/2016	50,4	14,3445854	14,1608334	11,02512
1283	14:10:00	22/09/2016	48	14,461791	14,4944448	-1,959228
1284	14:20:00	22/09/2016	48	14,5789967	14,6611109	-4,926852
1285	14:30:00	22/09/2016	47	14,8134079	14,8275	-0,845526
1286	14:40:00	22/09/2016	44,1	14,9071732	14,9938889	-5,202942
1287	14:40:00	22/09/2016	43,9	14,9071732	14,9944448	-5,236296
1288	14:50:00	22/09/2016	42,8	15,0243788	15,1611109	-8,203926
1289	15:00:00	22/09/2016	39,7	15,3056726	15,3280554	-1,342968
1290	15:10:00	22/09/2016	39,8	15,4932022	15,4947224	-0,091212
1291	15:20:00	22/09/2016	38	15,6807308	15,6602774	1,227204
1292	15:40:00	22/09/2016	43,9	16,0089073	15,9925	0,984438
1293	15:50:00	22/09/2016	42,3	16,0089073	15,9925	0,984438
1294	15:50:00	22/09/2016	42,6	16,0089073	15,9925	0,984438
1295	16:00:00	22/09/2016	40,4	16,0089073	15,9925	0,984438
1296	16:10:00	22/09/2016	39,2	16,0089073	15,9925	0,984438
1297	16:20:00	22/09/2016	38,3	16,0089073	15,9925	0,984438
1298	16:30:00	22/09/2016	38,1	16,0089073	15,9925	0,984438

Los gráficos obtenidos para este día son:

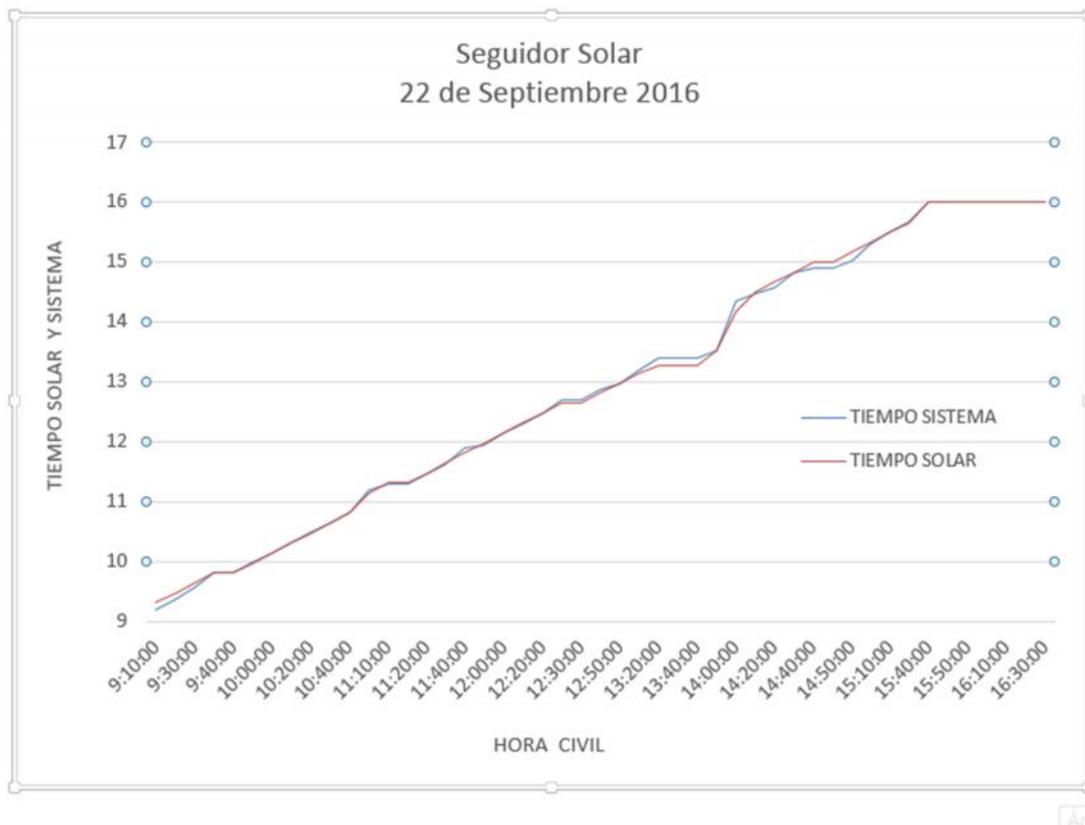


FIGURA 66: Gráfico del seguimiento del Tiempo TSV y Tiempo del sistema para el 22 de Septiembre del 2016

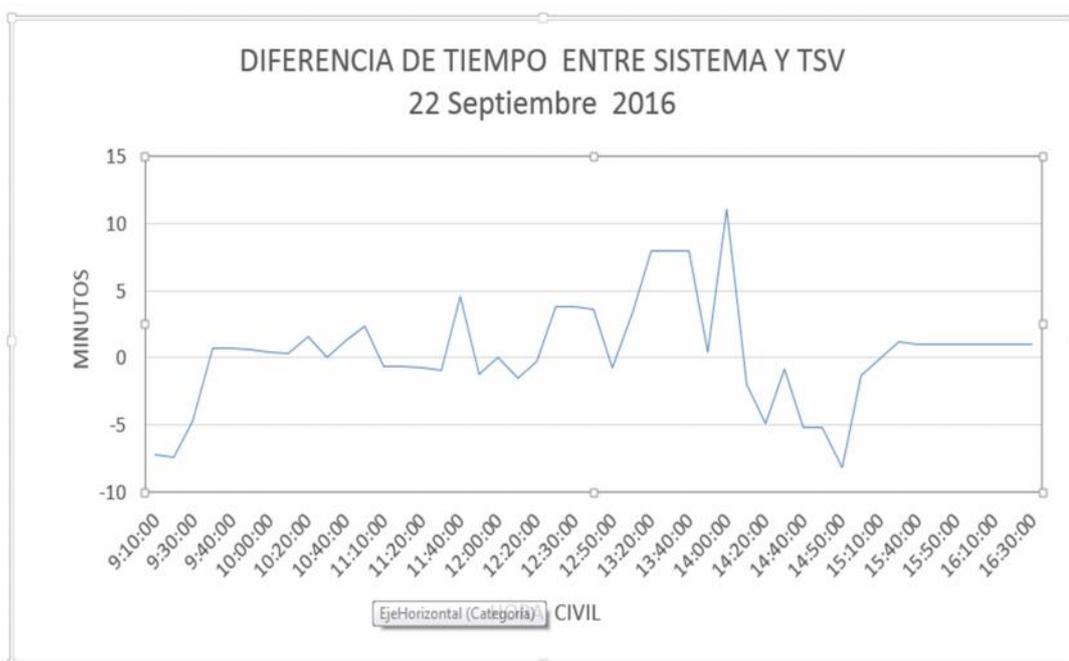


FIGURA 67: Gráfico del error producido entre el TSV y el Tiempo del sistema para el 22 de Septiembre del 2016.

5.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DATOS DEL SEGUIDOR SOLAR

En el análisis realizado en el apartado 4.1.1.3. Análisis del Seguimiento solar del conjunto mecánico del CCP, se determinó que según las fórmulas (4,14) y (4,16) la tolerancia para el sistema era un ángulo de $2,12^\circ$ o en tiempo 8,48 minutos, a través del análisis estadístico siguiente se determinará si se excede esta tolerancia. Este análisis se ha realizado en base al uso de fórmulas directas usadas en Excel, y permiten determinar el comportamiento del seguidor solar respecto del TSV.

Tabla 19

ANÁLISIS ESTADÍSTICO 19/09/2016

ANÁLISIS ESTADÍSTICO POR DÍA		19/09/2016	
	MINUTOS	SEGUNDOS	MIN Y SEG
CONSIGNA	0	0	
VALOR MEDIO DEL TC VS TSV	-0,3039	-18,23	18 SEGUNDOS
ERROR MÁXIMO DEL TC VS TSV	3,08447	185,07	3 MIN Y 4 SEG
DESVIACIÓN ESTANDAR TC VS TSV	1,16852	70,11	1 MIN Y 10 SEG

Para el primer día el sistema funciono en promedio con un tiempo de retraso constante frente a la consigna de 18 segundos, el máximo error de seguimiento fue de 3 minutos y 4 segundos y la desviación estándar que es el índice numérico de la dispersión del conjunto de datos, llega a 1 minuto y 10 segundos. Este día de adquisición de datos fue un día con alta nubosidad, pero con calma frente a los vientos, esto se evidencia en las medidas del termómetro del tubo que mantuvo valores bajos de temperatura.

Tabla 20**ANÁLISIS ESTADÍSTICO 20/09/2016**

ANÁLISIS ESTADÍSTICO POR DÍA		20/09/2016	
	MINUTOS	SEGUNDOS	MIN Y SEG
CONSIGNA	0	0	
VALOR MEDIO DEL TC VS TSV	1,27191	76,31	1 MIN Y 16 SEG
ERROR MÁXIMO DEL TC VS TSV	9,52945	571,77	9 MIN Y 20 SEG
DESVIACIÓN ESTANDAR TC VS TSV	2,85619	171,37	2 MIN Y 51 SEG

El sistema funcionó en promedio con un tiempo de adelanto constante frente a la consigna de 76 segundos, el máximo error de seguimiento fue de 9 minutos y 20 segundos y la desviación estándar que es el índice numérico de la dispersión del conjunto de datos, llega a 2 minutos y 51 segundos. Este día estuvo despejado con mucha radiación directa, se observa que el tubo absorbedor presento la mayor temperatura de todos los días. El valor de error máximo se produce por saltos que se producen ante el atrancamiento de la polea, hasta romper el coeficiente de rozamiento estático del eje.

Tabla 21**ANÁLISIS ESTADÍSTICO 21/09/2016**

ANÁLISIS ESTADÍSTICO POR DÍA		21/09/2016	
	MINUTOS	SEGUNDOS	MIN Y SEG
CONSIGNA	0	0	
VALOR MEDIO DEL TC VS TSV	2,03853	122,31	2 MIN Y 2 SEG
ERROR MÁXIMO DEL TC VS TSV	9,34356	560,61	9 MIN Y 21 SEG
DESVIACIÓN ESTANDAR TC VS TSV	3,42999	205,8	3 MIN Y 25 SEG

Para el tercer día, se desecharon 4 valores que corresponden a observaciones atípicas del sistema (ANDERSON D., SWEENEY D., & WILLIAMS T., 2008, pág. 102) el sistema funciono en promedio con un tiempo de adelanto constante frente a la consigna de 2 minutos y 2 segundos, el máximo error de seguimiento fue de 9 minutos y 21 segundos y la desviación estándar que es el índice numérico de la dispersión del conjunto de datos, llega a 3 minutos y 25 segundos. Este día tubo alta nubosidad y alta radiación directa, se evidencia por que la temperatura no alcanzó valores altos como el día anterior, se presentó el problema de la polea de vencer la inercia estática que tiene, además se observa oscilación en el sistema con valores de la desviación estándar mayores a la de los otros 2 días por efecto de los vientos de ese día.

Tabla 22

ANÁLISIS ESTADÍSTICO 22/09/2016

ANÁLISIS ESTADÍSTICO POR DÍA		22/09/2016	
	MINUTOS	SEGUNDOS	MIN Y SEG
CONSIGNA	0	0	
VALOR MEDIO DEL TC VS TSV	-0,7841	-47,05	47 SEG
ERROR MÁXIMO DEL TC VS TSV	11,0251	661,51	11 MIN Y 1 SEG
DESVIACIÓN ESTANDAR TC VS TSV	4,12956	247,77	4 MIN Y 7 SEG

Para el cuarto día, el sistema funcionó en promedio con un tiempo en retraso de 47seg constante frente a la consigna, el máximo error de seguimiento fue de 11 min y 1 segundos y la desviación estándar que es el índice numérico de la dispersión del conjunto de datos, llega a 4 minutos y 7 segundos. El día tuvo un clima bastante parecido al anterior, esto presento oscilaciones en el sistema que hicieron que los datos tengan una dispersión más grande.

Tabla 23

ANÁLISIS ESTADÍSTICO TOTAL

ANÁLISIS ESTADÍSTICO TOTAL			
	MINUTOS	SEGUNDOS	MIN Y SEG
CONSIGNA	0	0	
VALOR MEDIO DEL TC VS TSV	0,72072	43,24	43 SEG
ERROR MÁXIMO DEL TC VS TSV	11,0251	661,51	11 MIN Y 1 SEG
DESVIACIÓN ESTANDAR TC VS TSV	3,30693	198,42	3 MIN Y 18 SEG

Un análisis total del conjunto de datos, presenta las siguientes conclusiones, el posicionamiento del sistema tiene 47 segundos en adelanto frente al TSV, sin embargo no se detecta que este valor sea incremental, debido a que se tiene un chequeo cada 20 minutos del estado del sistema parando el sistema o adelantándolo hasta conseguir igualarse al TSV. El valor máximo de error es de 11 minutos, sin embargo este valor es ocasional producto de algún problema aleatorio mecánico, principalmente que se produce en la polea por su elasticidad.

La desviación estándar esta en los 3 minutos y 18 segundos, que es la dispersión de los valores frente al valor medio de 43 segundos, cuando se tiene una dispersión de +/- 2 desviaciones estándar, en una curva normal se tienen una certeza de que el 96% de valores de la muestra están comprendidos dentro de este intervalo, por lo tanto 2 desviaciones estándar equivale a 6 minutos y 36 segundos, y si se considera una desviación de la media frente a la consigna de 43 segundos, que sumados a los 6 minutos y 36 segundos, se tiene 7 minutos 19 segundos, que está dentro de la tolerancia del sistema que es de 8 minutos 29 segundos, sin que los rayos solares se desvíen del tubo absorbedor.

5.3 PROYECCIONES FUTURAS APLICABLES A MODELOS PRODUCTIVOS

La radiación solar no ha sido estudiada en nuestro país, especialmente en aquellos sitios que pueden tener un alto recurso solar, el uso de observaciones en superficie frente a los resultados proporcionados por la NASA mediante imágenes satelitales que genera la información de la radiación para un sitio determinado, es tan amplio que abarca varias zonas con múltiples microclimas, por eso la observación satelital no reemplaza la información convencional sino que la complementa, el Trabajo desarrollado por (MARTINEZ J & ASITIMBAY J., 2015) determina que en sitios aledaños al OCP se tiene el recurso solar para ser aplicado en aplicaciones de baja y media temperatura como son Yaruquí (Pichincha) con 4,61 kWh/m²/día, Lumbaqui (Sucumbíos), con 3,65 kWh/m²/día, San Francisco de Borja (Napo) 3,47 kWh/m²/día, Papallacta (Napo) 3,46 kWh/m²/día y Nueva Loja (Sucumbíos) con 3,46 kWh/m²/día. (Pág. 97).

Sin embargo hay sitios que tienen mayor insolación diaria, en la tabla 21 se puede apreciar las horas de insolación diaria basada en un estudio del año 1983.

Al ser estudios antiguos, sirven como referencia de nuevos trabajos a desarrollar, principalmente en zonas de Manabí, Guayas y Santa Elena, y varias zonas de la región interandina que tienen climas secos como son Ambato, Imbabura; Loja, etc. El gobierno no ha dado fomento al aprovechamiento de la energía solar térmica, la resolución No CONELEC-004/11 emitida el 2011 incentivó únicamente la generación de energía fotovoltaica, sin embargo el 21 de Junio del 2013, entró en vigencia una nueva resolución la No CONELEC- 001- 13 que eliminan todo tipo de iniciativas para el aprovechamiento del recurso solar. Esto a desmotivado al sector público y privado de incursionar en estas nuevas tecnologías a mediana y gran escala, y solo ha existido un desarrollo incipiente de instalaciones de baja temperatura principalmente de uso residencial o

aplicados a invernaderos con el fin de reducir costos por consumo de gas licuado de petróleo (GLP) o de electricidad.

Tabla 24

Horas de Sol diarias en diferentes regiones del Ecuador

REGION	ESTACION	INSOLACION EN HORAS	ESTACION	INSOLACION EN HORAS
LITORAL	GUAYAQUIL	1580	PASAJE	790
	PORTOVIEJO	1310	SANTO DOMINGO	770
	SAN LORENZO	1080	ING. SAN CARLOS	760
	ISABEL MARIA	960	PUERTO ILA	670
	PCHINGUE	930	BUCAJ	470
ANDINA	QUITO	2040	CUENCA	1560
	AMBATO	1780	BAÑOS	1400
	LOJA	1650	TULCAN	1350
	RIOBAMBA	1600	PISAYAMBO	1170
AMAZONICA	TIPUTINI	1420	PUYO	970
INSULAR	SAN CRISTOBAL	2350		

Fuente: (Pourrut P., 1983, pág. 25)

El Ecuador ante la escasez de fuentes de energía convencionales principalmente del agotamiento del Petróleo se ven en la necesidad de incurrir en este nuevo tipo de tecnologías, los sistemas cilindro parabólicos tienen aplicación a mediana escala y gran escala en generación eléctrica, donde se constituyen en componentes de sistemas de generación térmica híbridos, por un lado utilizan energía convencional y energía térmica con generación solar.

Sistemas probados determinan que el aporte de energía solar sobre el sistema llega a ser del 15 % en sistemas de generación de ciclo combinado ISCCS (Integrated Solar Combined Cycle System). La figura 74 muestra un diagrama de un sistema híbrido con energía solar y combustibles fósiles. (Fernández Salgado, 2010, pág. 444)

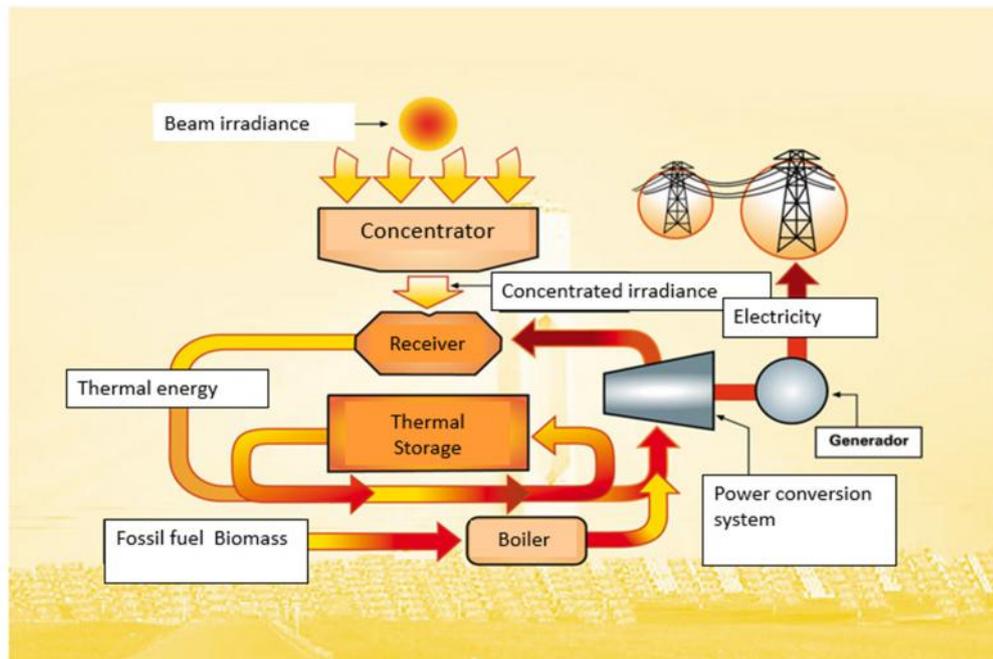


Figura 68: Planta de Generación Híbrida

Fuente: (Silva, 2009, pág. 20)

Como se puede observar en la figura 75, la tendencia para el año 2020 es que la generación de energía eléctrica de un 43% de hidroelectricidad pase a un 80% y que además estaría complementado por un 4% de energía renovable, la energía térmica de origen fósil se convertirá en un 9% de la energía generada, la ubicación de las centrales térmicas con fuentes convencionales que pueden convertirse en híbridas son principalmente aquellas que están en climas secos, con alta insolación y pueden ser las que se encuentran ubicadas en Manabí, con la central Miraflores de 11,5 MW de potencia efectiva, Guayas Central Aníbal Santos de 106 MW de potencia efectiva, Const. EQT/EQL de Pot Efec. 72MW, Gonzalo Cevallos de 140 MW de PE. Guayaquil 40 MW de PE., la suma de estas potencias es igual a 369.5 MW, como se citó, es posible producir con energía Solar hasta un 15 % de esta potencia efectiva, lo que implica que 55,42 MW es posible generar con sistemas cilindro parabólicos, que convertidos a energía equivalen a 436.970,7 MW hora/año de ahorro, (considerando un factor de planta de 0,9), que en barriles de petróleo representa 246 mil barriles de petróleo al año.

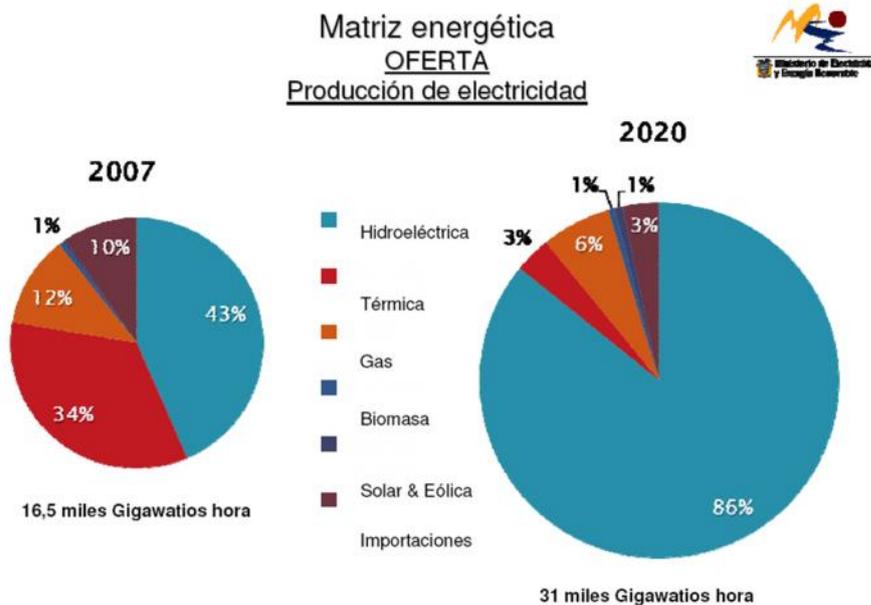


Figura 69: Producción de Electricidad para el año 2007 y del 2020

(Ministerio de Electricidad y Energías Renovables, 2007)

El recurso solar en el Ecuador está totalmente por explotarse, conociendo que el País es uno de los sitios con mayor irradiación solar en el mundo debido a su ubicación geográfica, deben el sector público y privado comenzar a incursionar en esta clase de soluciones aplicadas a sistemas de generación fijos, de tal manera que cuando la energía fósil llegue a costos elevados, el Ecuador ya tenga desarrollada tecnología aplicada a fuentes híbridas de generación, para que la brecha tecnología con los países desarrollados no nos convierta en meros consumidores de conocimientos y técnicas de estos.

5.4 EVALUACIÓN TÉCNICA DEL SISTEMA CILINDRO PARABÓLICO

El sistema instalado en la ESPE fue concebido como un Megaproyecto que permite incursionar por primera vez en sistemas de media temperatura con tecnología propia y usando componentes que sean de fácil adquisición en el mercado local.

El sistema construido puede dividirse en 2 etapas claramente diferenciadas: La primera corresponde al aprovechamiento de las energías

renovables en base a generar calor a media temperatura (100°C - 400°C) basado en el uso de un sistema concentrador de energía solar, la segunda corresponde al uso eficiente de la energía, también considerada como energía renovable, en una aplicación práctica, como son varios sistemas de intercambio de calor.

El presente análisis técnico se hará únicamente sobre el sistema de generación ya que este está ligado íntimamente al sistema de seguimiento solar implementado en este trabajo.

En el estado del arte analizado en el capítulo 2 se menciona que para los sistemas cilindro parabólicos instalados, probados y en pleno funcionamiento se consigue eficiencias del 15%, esto determina que si por un lado se tiene en Quito, como referencia la medida en la estación del OCP en Yaruquí (Pichincha) con 4,61 kWh/m²/día, (MARTINEZ J & ASITIMBAY J., 2015, pág. 97), y por otro lado la superficie del sistema cilindro parabólico conociendo el arco de circunferencia que es 1,5 metros pero el área de captación es 1,2 metros y el largo de cada uno de los 6 espejos instalados es 1,5 metros entonces el área total del conjunto será: 10,8 m².

En el Capítulo 3 se demostró que el sistema CCP construido corresponde a un sistema con perfil cilíndrico, en tal caso, estos sistemas resultan eficientes cuando el ángulo de corona es máximo 60°, si se supera este ángulo los rayos reflejados inciden sobre un plano paraxial y no sobre un punto que es el foco paraxial, como el ángulo de corona es 90° entonces prácticamente la superficie que refleja sobre el foco se reduce a 1/3 del área total de los reflectores, por lo tanto el área útil se reduce a : 3,6m²

Así la energía recibida útil sobre el sistema será:

$$\text{Energía incidente sobre el sistema} = 4,61 \times 3,6 \text{ kWh/día}$$

$$\text{Energía incidente sobre el sistema} = 16,60 \text{ kWh/día}$$

Como se mencionó anteriormente la eficiencia de estos sistemas es de 15 %, entonces la energía generada por el sistema será:

Energía generada por el sistema = 2,48 kWh/día

Aunque este es el valor por día, se puede considerar que durante el tiempo de seguimiento se puede considerar un equivalente de tiempo de 5 horas de incidencia solar de este valor (MARTINEZ J & ASITIMBAY J., 2015, pág. 97) por lo tanto la energía generada por el sistema en una hora será:

Energía generada en el sistema = 0,497kWh = 1789 kJ

Si se conoce que

$$Q = cm\Delta t \quad (5.1)$$

Dónde: $c = 2,2 \text{ kJ/kg}^\circ\text{K}$ constante calórica del aceite térmico

$m = \text{masa del Aceite térmico en el tanque de reserva del CCP}$

$\Delta t = \text{incremento de temperatura producida desde la } T \text{ ambiental}$

La masa del aceite térmico se puede calcular ya que en el tanque de reserva se encuentra depositados aproximadamente 20 galones de aceite que equivalen 75,7 litros, y cuya densidad es 870 kg/m³, por lo tanto la masa será: 65,85 kg, reemplazando estos valores en la ecuación 5.1 se tiene que el incremento de temperatura considerando una temperatura ambiental de 15° Centígrados en el ambiente.

$$1789\text{kJ} = 2.2 \times 65,85 \times (T_{\text{final}} - (273 + 15))$$

$$T_{\text{final}} = 27,3^\circ\text{C}$$

Sin considerar las pérdidas térmicas, el incremento de temperatura será de 27,3°C en el fluido térmico por día, y por lo tanto hay un aprovechamiento de la energía solar. Sin embargo habrá que desarrollar un análisis más preciso de las pérdidas que se tiene en el reflector así como en el aislamiento y transporte del fluido térmico, además se debe corregir la geometría del reflector para poder tener mayor incidencia solar sobre el tubo

absorvedor. Todo este análisis será parte de otros trabajos del Megaproyecto del CCP instalado en la Universidad de la Fuerzas Armadas.

El sistema de seguimiento solar se constituye en parte del sistema CCP, cuya instalación permite aumentar la eficiencia del sistema, en los capítulos anteriores se demostró que el seguimiento es preciso y está dentro de los límites tolerables para conseguir la incidencia de los rayos reflejados sobre el tubo absorvedor.

5.5 EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL SISTEMA CILINDRO PARABÓLICO

El sistema instalado en el ESPE consta de varias etapas como se señaló anteriormente, por lo tanto cada uno de los componentes instalados tiene un valor parcial en su construcción, el análisis siguiente será exclusivamente referente a la etapa de seguimiento solar y que corresponde a este trabajo.

Se ha querido desarrollar un análisis económico basado en costos directos cuyos componentes son los materiales y mano de obra que participo directamente en la ejecución del proyecto, y los costos indirectos que son aquellos generales y que no participan directamente en el proyecto.

Los costos de los materiales son reales y son los valores con los cuales fueron adquiridos los equipos, los costos de mano de obra corresponde a la tabla que entrega la Contraloría General del Estado del Ecuador para el cálculo de análisis de precios unitarios en obras públicas en el año 2016, el costo del director es una valoración del pago por hora por honorarios que extiende la ESPE a los directores de proyecto, los costos indirectos se obtienen de una valoración general en el tiempo de los costos respectivos.

Tabla 25

Costos Directos de Materiales

MATERIALES				
DESCRIPCIÓN	CANT.	UN.	P. UNIT (USD)	P. TOTAL (USD)
SISTEMA MECANICO				
Motoreductor 4 Etapas motor 1/6 HP	1	u	1760	1760,00
Poleas 5" de diámetro	2	u	18	36,00
banda 52 pul	1	u	28	28,00
soporte de motor	1	u	55	55,00
material menudo	1	u	30	30,00
			SUBTOTAL	1909,00

MATERIALES				
SISTEMA ELECTRICO				
tablero 100x80x25cm	1	u	240	240,00
contactores 30 amp	1	u	25	25,00
rele térmico	1	u	9,5	9,50
TVSS de 65 kA trifásico	1	u	82	82,00
disyuntor riel din 6-40 amp	18	u	4,5	81,00
disyuntor trifásico 50 Amp SQD	1	u	27	27,00
cable 4x8 TW AWG flex concéntrico	40	m	4,2	168,00
varilla de tierra, cable, sold exotérmica	1	1	35	35,00
material menudo	1	u	50	50,00
			SUBTOTAL	717,50

MATERIALES				
SISTEMA ELECTRONICO				
PLC Allen Bradley Micrologix 1400	1	u	1230	1230,00
Variador de Frecuencia Allen Bradley POWER FLEX 1HP	1	u	520	520,00
Encoder incremental 1000 pulsos	1	u	192	192,00
Sensor microswitch	3	u	7,92	23,76
fuelle de poder electrónica	1	u	80	80,00
material menudo	1	u	40	40,00
			SUBTOTAL	2085,76
			TOTAL MATERIALES	4712,26

Tabla 26
Costos Directos de Mano de Obra

MANO DE OBRA

DESCRIPCION	CANT.	HORAS	COSTO HORA (USD)	P. TOTAL (USD)
Mano de obra directa	1	650	3,66	2379,00
Ingeniería de programación	1	545	3,67	2000,15
			TOTAL DE MANO DE OBRA	4379,15

EL COSTO HORA ES OBTENIDO DE LA TABLA DE COSTOS DE MANO DE OBRA DE LA CONTRALORIA GENERAL DEL ESTADO

Tabla 27

Costos Directos Indirectos y de Administración

COSTOS INDIRECTOS				
DESCRIPCIÓN	CANT.	UNID	P. UNIT (USD)	P. TOTAL (USD)
Útiles de Oficina	1	U	30,00	30,00
Transporte	1	U	80,00	80,00
Servicios Básicos	1	U	30,00	30,00
Impresiones	1	U	90,00	90,00
Copiado de textos	1	U	60,00	60,00
Varios	1	U	50,00	50,00
TOTAL COSTOS INDIRECTOS				340,00

Tabla 28

Costos totales del Proyecto

TOTAL DE COSTOS	
DESCRIPCIÓN	P. TOTAL (USD)
COSTOS DIRECTOS Y MANO DE OBRA	9091,41
COSTOS INDIRECTOS Y ADMINISTRACION	340,00
COSTO TOTAL DEL PROYECTO	9431,41

Este proyecto fue desarrollado como un proyecto de titulación y no con objeto de tener un rendimiento económico sobre el mismo, por lo tanto, no se hace un análisis de rendimiento financiero del mismo.

5.6 EVALUACIÓN AMBIENTAL DEL SISTEMA CILINDRO PARABÓLICO

El impacto ambiental producido por los sistemas de energía solar térmica es positivo ya que normalmente sirve para reemplazar energía de fuentes convencionales como el petróleo, por lo tanto, no existen emisiones atmosféricas asociadas con estos sistemas, ni otros impactos sobre la calidad del aire, el agua y el suelo, no produce ruidos, no genera riesgos para la seguridad en situaciones normales de trabajo, sin embargo se puede decir que tiene un impacto visual sobre los terrenos en los cuales están instalados los sistemas, además de la ocupación propia que dependiendo de la ubicación puede tener impacto sobre la flora y fauna, pero en ningún momento resulta ser mayor que cualquier otra planta convencional ubicada en el mismo sitio, normalmente los CCP, la ocupación se considera 1 MWe por cada 4 hectáreas, sin embargo en los sistemas de colectores lineales tipo Fresnel, existe la posibilidad de combinar el uso del suelo con fines agrícolas o estacionamientos debajo de las instalaciones.

Otra de las ventajas es que en el proceso de cierre del proyecto, el desmontaje no entraña dificultades ya que todos sus materiales son susceptibles de ser reciclados. (Fernández Salgado, 2010, pág. 472)

Sin embargo, en el proceso de construcción existes ciertos impactos ambientales negativos propios de cualquier obra civil en construcción, la tabla siguiente propone los impactos significativos producidos y los objetivos que permitirían minimizarlos:

TABLA 29

Análisis de Impactos Ambientales Significativos y Acciones propuestas

IMPACTO AMBIENTAL SIGNIFICATIVO	ESTADO	ACCION PROPUESTA
USO DEL SUELO - PERDIDA DEL HABITAT	NORMAL	Evitar Uso de áreas ecologicamente sensibles, restablecimiento de flora y fauna locales
CONTAMINACIÓN TERMICA O QUIMICA DEL AGUA	EMERGENCIA	cumplimiento de las normas y leyes ambientales y buenas prácticas de operación

Fuente: (Fernández Salgado, 2010, pág. 477)

Lo descrito anteriormente representa el análisis de aspectos ambientales significativos para sistemas cilindro parabólicos de manera general, en el caso particular del sistema instalado en la ESPE se realizará el siguiente análisis.

Según la Constitución del Estado Ecuatoriano en su Artículo 276: El régimen de desarrollo tendrá los siguientes objetivos:

4. Recuperar y conservar la naturaleza y mantener un ambiente sano y sustentable que garantice a las personas y colectividades el acceso equitativo, permanente y de calidad al agua, aire y suelo, y a los beneficios de los recursos del subsuelo y del patrimonio natural.

En el Artículo 396:

El Estado adoptará las políticas y medidas oportunas que eviten los impactos ambientales negativos, cuando exista certidumbre de daño. En caso de duda sobre el impacto ambiental de alguna acción u omisión, aunque no exista evidencia científica del daño, el Estado adoptará medidas protectoras eficaces y oportunas.

Cada uno de los actores de los procesos de producción, distribución, comercialización y uso de bienes o servicios asumirá la responsabilidad directa de prevenir cualquier impacto ambiental, de mitigar y reparar los daños que ha causado, y de mantener un sistema de control ambiental permanente.

Las acciones legales para perseguir y sancionar por daños ambientales serán imprescriptibles.

Y según la Ley de LEY DE GESTIÓN AMBIENTAL en su artículo 23 define los componentes de la evaluación de impacto ambiental en los siguientes aspectos:

1. La estimación de los efectos causados a la población humana, la biodiversidad, el suelo, el aire, el agua, el paisaje y la estructura y función de los ecosistemas presentes en el área previsiblemente afectada; 2. Las condiciones de tranquilidad pública tales como: ruido, vibraciones, olores, emisiones luminosas, cambios térmicos y cualquier otro perjuicio ambiental derivado de su ejecución; y, 3. La incidencia que el proyecto, obra o actividad tendrá en los elementos que componen el patrimonio histórico escénico y cultural.

Siguiendo la metodología de uso común y de aceptación por parte del Ministerio del Ambiente de la República del Ecuador, para Estudios de Impacto Ambiental se partirá de un análisis de línea base, para posteriormente determinar los aspectos ambientales presentes en el proyecto, una vez determinados, se procederá mediante la Matriz de Leopold a determinar aquellos aspectos ambientales significativos, los cuales pueden causar Impactos ambientales significativos, seguido del plan de acción respectivo.

5.6.1 ANÁLISIS DE LÍNEA BASE

El sitio a ser analizado corresponde a terrenos de la Universidad de las Fuerzas Armadas ubicadas en la ciudad de Sangolquí, sector Valle de Los Chillos, su ubicación geográfica corresponde a lo que se determina según las coordenadas expuestas en la Figura 20, según se observa la ubicación del proyecto en el sitio corresponde a un terreno plano con césped y cuyo común anteriormente era con fines recreativos. Respecto a los principales componentes se observa que no ha existido elementos contaminantes al aire agua y suelo, el componente biótico del sector es escaso y corresponde a

pequeños animales de presencia común en las ciudades, no se observa posibles trastornos naturales o producidos que afecten el desarrollo e implantación del proyecto y que determinen la no viabilidad de ubicación en el sitio del mismo.

5.6.2 ANÁLISIS DE ASPECTOS AMBIENTALES SIGNIFICATIVOS

En el caso del CCP instalado en la ESPE, no posee impactos ambientales significativos, debido a que su tamaño es muy pequeño, respecto de la magnitud de otros sistemas existentes, de esta forma no entra en los parámetros mencionados anteriormente de un estudio de Impacto Ambiental y por lo tanto un Plan de Manejo Ambiental del sistema, el CCP como tal, no tiene elementos contaminantes tóxicos que tengan una gran afectación al agua, aire, suelo o medio biótico. Sin embargo, todo su trabajo deberá ser dentro del manejo de buenas prácticas ambientales, como cualquier proceso industrial y con respeto y cumplimiento de las leyes vigentes en el Ecuador.

TABLA 30

Matriz de Leopold

MATRIZ DE IDENTIFICACIÓN Y EVALUACIÓN DE ASPECTOS E IMPACTOS AMBIENTALES
 PROYECTO: CONCENTRADORES CILÍNDRICO PARABÓLICOS ESPE
 METODOLOGIA DE LEOPOLD

FECHA: OCTUBRE DEL 2016

Actividad / Producto / Servicio	Aspecto Ambiental	Impacto Ambiental	Evaluación:	Legal /Regulatorio	Tratamiento	Responsable de la Gestión	Cumplimiento 2015
Actividades contaminantes del aire	no existe	No aplica	No significativo				
Actividades contaminantes del agua	no existe	No aplica	No significativo				
Actividades contaminantes del suelo	no existe	No aplica	No significativo				
Actividades de afectación al medio biótico.	no existe	No aplica	No significativo				
Almacenamiento temporal residuos contaminados	mantenimiento de residuos de limpieza con aceite térmico	contaminación del suelo	Significativo	TULAS ANEXO 2	Colocar un tanque de recolección de residuos peligrosos con la identificación del mismo en el sitio	Por determinar ESPE	Por determinar ESPE
Estado de emergencia por rotura de tubería	Generación de residuos contaminados del suelo	contaminación del suelo	significativo	TULAS ANEXO 2	Generar un Tanque API para recolección de fluidos contaminantes en caso de emergencia que cubra el área del proyecto	Por determinar ESPE	Por determinar ESPE

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

1. El sistema de seguimiento cuyo comportamiento en este proceso se denomina Tiempo del Sistema, respecto del Tiempo Solar Verdadero, tiene un error medio de 43 segundos y una desviación estándar de 3 minutos y 18 segundos, para el total de los días analizados. Por otro lado, en el análisis comparativo de tolerancia de tiempo entre el seguidor solar y el movimiento del sol para la máxima incidencia permisible de los rayos sobre el sistema absorbedor (tubo de Absorción), se determinó que puede llegar a ser de 8 minutos y 28 segundos, por lo tanto, se demuestra que el proceso de seguimiento, considerando el error medio y la desviación estándar entre el Tiempo del Sistema y el TSV, son menores que la tolerancia máxima permisible en tiempo para que los rayos solares no sean reflejados al tubo absorbedor cuando el sistema de seguimiento no apunta directamente al sol.
2. El seguimiento está dado desde las 9h00 hasta las 16h00, que es durante el tiempo donde se obtiene la radiación solar significativa para este proceso en el sitio que ha sido instalado el equipo.
3. Para el proceso de seguimiento solar, se escogió el método del uso del Tiempo Solar Verdadero, es decir el seguimiento del sol considerando que este se mueve uniformemente en su traslación diaria debido a que el método basado en el uso de sensores presentaría problemas por la alta nubosidad en el sector de la ESPE, dicha nubosidad en el transcurso del año llega a tener un equivalente de 6 octas sobre el valor máximo que es de 8 octas.

4. La construcción correspondiente al sistema de seguimiento solar, se lo realizó enteramente con componentes de uso comercial, como son: la adquisición del motor de 1/6 de HP a 110 RPM, la 1 etapa de reducción variable de 4 a 6 Veces, las otras 3 etapas de reducción de 60,100y 44,1 veces, dentro de la parte mecánica, el variador de velocidad, PLC y Encoder para la parte electrónica, fueron de fácil adquisición, y con la posibilidad de escoger de una variedad de ofertantes en el Ecuador, los otros componentes son de uso común en cualquier sistema de control electromecánico. Lo que permite concluir que, esta clase de sistemas pueden ser desarrollados en el país, sin la necesidad de recurrir a tecnologías consagradas a esta clase de sistemas, que generarían una dependencia tecnológica con empresas extranjeras dedicadas a la construcción de esta clase de equipos.
5. El uso del sistema electrónico principalmente basado en la utilización de un variador de frecuencia que le dio al sistema la precisión necesaria, esta se alcanzó cuando el variador de frecuencia marca los 36,0 Hz, sin embargo, ante cualquier variación producida por influencias externas al sistema como son el viento, fuerzas de rozamiento en las chumaceras por desgaste, etc. Se ha considerado el chequeo de la posición del sistema mediante el Encoder cada 20 minutos, de tal manera que la comparación entre la posición del sistema que se convierte en un tiempo del sistema respecto del TSV, se ajusta sea parando el sistema si está en adelanto, a incrementando su velocidad si está en retraso, hasta que el TSV y Tiempo del sistema sean prácticamente iguales.
6. El estudio realizado corresponde al diseño e implementación de un sistema de seguimiento solar que se acopló al equipo construido e instalado en la ESPE, correspondiente a un sistema de espejos cilindro. Parabólicos, sin embargo, fue necesario analizar la geometría del sistema para determinar las características del sistema seguidor,

en tales circunstancias se realizó las respectivas medidas llegándose a determinar que el equipo corresponde a un reflector de tipo cilíndrico y no a un parabólico, El radio del cilindro es 0,72 metros, y el área de los 6 cuerpos reflectores es 10,8 metros.

7. El sistema CCP construido que corresponde a un sistema con perfil cilíndrico, este resulta ser eficiente cuando el ángulo de corona es máximo 30° , si se supera este ángulo los rayos reflejados inciden sobre un plano paraxial y no sobre un punto, que es el foco paraxial. Como el ángulo de corona del equipo construido es 90° , entonces, prácticamente la superficie que refleja sobre el foco, se reduce a $1/3$ del área total de los reflectores, por lo tanto el área útil se reduce a: $3,6\text{m}^2$.
8. El proyecto desarrollado abre la posibilidad de nuevos usos para el mismo, por ejemplo en la aplicación de centrales térmicas híbridas, sistemas de secado con seguimiento solar, campos de paneles fotovoltaicos con seguimiento solar, en los cuales, se consigue mejoras en la eficiencia de la conversión de energía, hasta en 40% sobre los sistemas estáticos.
9. Se puede concluir que el costo del prototipo analizado en la Evaluación Económica del Sistema Cilindro Parabólico puede ser disminuido una vez desarrollado a escala comercial, ya que los componentes son de uso común en el país, y el desarrollo de la ingeniería es amortizable en la construcción de equipos semejantes.
10. Esta clase de sistemas no generan impactos ambientales negativos significativos a escala industrial, al contrario, los impactos ambientales son positivos debido a la aplicación de energías renovables en reemplazo de energías de origen fósil. Para el sistema construido se ha realizado un estudio de Impacto Ambiental, basado en la metodología a partir de una matriz de Leopold.

RECOMENDACIONES

- 1 El sistema diseñado e implementado tiene un proceso continuo de funcionamiento en el tiempo, basado en el uso de todos los sistemas de reducción mecánica implementados, sin embargo, podría experimentarse con un sistema de pasos, que disminuya el número de equipos de reducción, pero deberá analizarse otro tipo de control y la afectación al motor producida por el sinnúmero de arranques y paradas que deberá realizar el variador de frecuencia.
- 2 Para esta clase de sistemas es necesario determinar el sitio en el que se encuentran implementados ya que puede incrementarse el número de horas de funcionamiento del equipo para obtener una mayor energía diaria proveniente del sol.
- 3 Se debe reconstruir el sistema para obtener una mayor ganancia en el reflector, de tal manera que se concentren los rayos en el foco paraxial y no en un plano focal, esto se conseguirá reduciendo el denominado ángulo de corona.
- 4 Para los otros sistemas construidos, se debe buscar la posibilidad de ubicar el motor de seguimiento con su sistema mecánico acoplado en el centro de los cuerpos que conforman el colector cilíndrico – parabólico, así se conseguirá una menor torsión del eje por la inercia de los cuerpos al ser más corta la distancia hacia los extremos.
- 5 Se puede implementar un sistema de desacoplamiento rápido del motoreductor con el fin de realizar movimientos manuales del sistema, sin tener que desarmar el equipo de seguimiento.
- 6 Se debe investigar para los otros cuerpos implementados y que ahora no se encuentran en funcionamiento, el uso de sistemas

basados en tornillos sin fin, y cremalleras, esta aplicación conlleva que habrá que construir parte del equipo reductor en algún taller mecánico ya que los elementos no existen en el mercado.

- 7 Se debe investigar el uso para los otros cuerpos implementados y que ahora no están en funcionamiento, el uso de sistemas (pistones) hidráulicos, esto permitirá cambiar de tecnología que es usar motoredutores, por el de bombas que manejan fluidos hidráulicos, válvulas de cierre y apertura controladas y drivers que manejen la presión de las bombas.
- 8 Se puede mejorar el sistema construido, al implementar un sistema de sensores de comparación de la alineación solar, de tal manera que funcione en forma híbrida el sistema, tanto con los sensores como con el TSV, esto es de singular importancia en sitios de baja nubosidad.
- 9 Se puede mejorar el sistema de acoplamiento del motor al sistema, buscando una forma más rígida y que presente menos elasticidad para vencer la inercia del sistema como son ahora las poleas.
- 10 Se debe mejorar el sistema de equilibrio con las pesas para tener un menor torque, así como disminuir la resistencia por rozamiento en el equipo.

BIBLIOGRAFÍA

- Piedrafita Moreno, R. (2001). *INGENIERÍA DE LA AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL*. Madrid: Ra-Ma Editorial.
- Almanza , R., & Muñoz, F. (1993). *Ingeniería de la Energía solar*. México: El colegio Nacional.
- Anderson B., & Moore J. (1989). *Optimal Control: Linear Quadratic Methods*. USA: Prentice Hall.
- ANDERSON D., SWEENEY D., & WILLIAMS T. (2008). *Estadística para la Administración y Economía 10 Ed*. Mexico D.F.: Cengage Learning.
- Bachiller, R. (2009). EL SOL: NUESTRA ESTRELLA, NUESTRA ENERGÍA. *Anuario del Observatorio Astronómico Nacional de Madrid*.
- Camarena, P. (1985). *ELECTRICIDAD INDUSTRIAL Y DIAGRAMAS*. México: Continental S.A.
- CIEEPI -ISSN 2477-8958. (2016). Viabilidad técnica y económica d sistemas termosolares en el Ecuador. *CIEEPI*, 30.
- Conde C. (2007). *México y el cambio climático global*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Doyle J., & Stein G. (1981). Multivariable feedback design: concepts for classical/modern synthesis. *IEEE Transactions on Automatic Control* , 4-16.
- DUNLOP. (s.f.). <http://www.dunlop.com.ar/productos/correas/uso-industrial/>. Recuperado el 10 de 09 de 2026
- Enriquez Harper, G. (2002). *GUÍA PRÁCTICA PARA EL CÁLCULO DE INSTALACIONES ELECTRICAS*. México: Limusa.
- Escobar Mejia, A. (2010). Disign and Implementation of a solar Tracking Prototype for optimize a PV System. *Scientia et Technica Año XVI No 44*.
- Fernández Salgado, J. (2010). *COMPENDIO DE ENERGÍA SOLAR*. Madrid: Mundiprensa.

- George, B. c. (Octubre de 2005). Design and construction of a two-axis Sun tracking systme por parabolic trough collector (PTC) efficiency improvement. Xanthi, Greece: University of Thrace.
- Gonzalez Velasco, J. (2009). *Energías Renovables*. Barcelona: Reverté S.A.
- GROSSI GALLEGOS, H. (s.f.). *El Sol en el tiempo y en el Espacio*.
- Grossi, H. (2004). *NOTAS SOBRE RADIACIÓN SOLAR*. Buenos Aires: Universidad Nacional de Lujan.
- [http://image.slidesharecdn.com/energiasolar. \(s.f.\). Obtenido de 111022200532-phpapp01/95/energia-solar-18-728.jpg?cb=1319314060](http://image.slidesharecdn.com/energiasolar. (s.f.). Obtenido de 111022200532-phpapp01/95/energia-solar-18-728.jpg?cb=1319314060).
- INAMHI. (2014). *ANUARIO METEOROLÓGICO*. QUITO: INAMHI.
- INTERMEC. (s.f.). www.intermec.com.co/. Recuperado el 10 de 09 de 2016
- Jutglar, L. (2004). *ENERGÍA SOLAR* . Barcelona: CEAC.
- Laboratorio de Optica aplicada - universidad del Istmo Tehuantepec. (2013). *Laboratorio de optica aplicada*. Sto. Domingo Tehuantepec, Oax., México: universidad del Istmo Tehuantepec.
- Leithead W., & O'Reilly J. (1991). Multivariable control by individual channel design. *Internationall Journal of control*, 1-46.
- Llorente Sánchez, I. (2015). *Estado del Proyecto de fin de Carrera Estado del Arte de tubos receptores para captadors cilindro-parabólicos, Comparaciòn de Modelos Estáticos*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Madrid vicente, A. (2009). *CURSO DE ENERGÍA SOLAR*. Madrid: Mundi-Prensa.
- Madrid Vicente. (2009). *CURSO DE ENERGÍA SOLAR*. Madrid: MUNDIPRENSA.
- Maloney , T. (1997). *ELECTRÓNICA INDUSTRIAL MODERNA 3ra Ed.* México: Prentice Hall.
- MARTÍNEZ J, & ASITIMBAY J. (2015). *Caracterización y analisis estadístico de la Radiación Solar Directa para Aplicaciones de Media y Alta Temperatura en Áreas Circundantes al OCP*. Sangolquí.
- Martínez J., & Asitimbay J. (2015). *Caracterización y analisis estadistico de la Radiación Solar Directa para Aplicaciones de Media y Alta Temperatura en Áreas Crcundantes al OCP*. Sangolquí.

- Mendez Muñiz, J. M., & Cuervo García, R. (2010). *Energía Solar Térmica 3ra Edición*. Madrid: Bureau Veritras Business School.
- Méndez, J., & Cuervo, R. (s.f.). *ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA 7ma Ed.* Madrid: Fundacion Confemetal.
- Meñat Salidegoitia, I. (2008). Energía Solar. *Dyna*, 561-566.
- Ministerio de Electricidad y Energías Renovables. (2007). *Matriz Energética del Ecuador*. Quito.
- Navntoft, C. &. (2008). *Método Gráfico y simplificado de Cálculo de Irradiación Media Mensual sobre un Plano Inclinado*. Buenos Aires: Universidad Tecnológica Nacional.
- Pacco k. (2008). Tesis. *Evaluación energética Comparativa de un sistema Híbrido Eólico Fotovoltaico de baja potencia para la electrificación de una vivienda urbana Tacna - Perú*. Tacna, Perú. Obtenido de <http://www.monografias.com/trabajos82/energia-solar-fotovoltaica-y-sus-aplicaciones/energia-solar-fotovoltaica-y-sus-aplicaciones.shtml>
- Palomar J., & Casanova P. (2009). Nuevo sistema de seguimiento solar en dos ejes basado en el mecanismo de biela-manivela. *Dyna vol 84*, 671-680.
- Patrana , Y., Oviedo , J., & Cogollo , R. (2006). DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CIRCUITO DE CONTROL PARA SEGUIDORES SOLARES ELECTRÓNICOS. *REVISTA COLOMBIANA DE FÍSICA VOL. 38 No 2*.
- Pourrut P. (1983). *Los Climas del Ecuador Fundamentos Explicativos*. Quito: Ministerio de Agricultura del Ecuador.
- Quintero Restrepo, J. (2015). *Estudio sobre Iluminación natural en lugares de poco acceso de Luz*. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.
- R.I, S., & Oduyemi, T. (Octubre de 1985). An electronic Sun finder and Solar tracking system. *technical note*. Akoka , Nigeria.
- Ramirez, I., & Meléndez, J. (2007). HIP 56948: A SOLAR TWIN WITH A LOW LITHIUM ABUNDANCE. *The Astrophysical Journal Letters*.
- Rey , F., & Velasco , E. (2010). *EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EDIFICIOS*. Madrid: Paraninfo.
- Rohner, P. (1990). *Control for Industrial Automation*. . New York: Wiley.

- Roldan Vilorio, J. (2013). *ORGANIZACIÓN Y CONTROL DEL MONTAJE DE INSTALACIONES SOLARES FOTOVOLTAICAS*. España: Paraninfo S.A.
- Romero Álvarez , M. (2006). Energía Solar Termoeléctrica. *Director Plataforma Solar de Almería - CIEMAT, Apartado 22, 22*.
- Roncero E., & Jiménez F. (2011). Introducción a la Ing. Aeroespacial . *Mecánica Orbital* (pág. 42). Sevilla : Universidad de Sevilla.
- schneider-electric. (s.f.). www.schneider-electric.com.ar/documents/recursos/myce/capitulo10_1907.pdf.
- Severino, Y. &. (2012). *La esfera celeste*.
- Shigley, J. (1989). *Manual de Diseño Mecánico*. México: Mc Graw Hill.
- Stallcup J. (2005). *STALLCUP'S ELECTRICAL CALCULATIONS SIMPLIFIED NEC 2005*. Sudbury: Jones and Bartlett Publishers.
- Szokolay, S. (1978). *Energía Solar y Edificación*. Barcelona: Blume.
- Ugalde Loo C. (2016). control de motores de inducción utilizando la función de estructura multivariable. Mexico, México.
- Zames G. (1981). Feedback and optimal sensitivity: model reference transformations, multiplicative seminorms, an approximate inverse. *IEEE Transactions on automatic control*, 301-320.