

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

“Diseño e implementación del sistema de instrumentación de un destilador solar de alto rendimiento”.

POR
SARA OLIVIA GARCIA DIAZ

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

DIRECTOR DE TESIS:
DR. HECTOR AURELIO MORENO CASILLAS

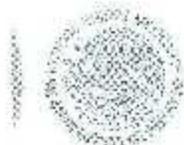
CO-DIRECTOR DE TESIS:
DR. FRANCISCO GERARDO FLORES GARCIA

ISSN: 0188-9060



RIITEC: (20)-TMCIE-2013

Torreón, Coahuila, Méx.co.
Diciembre, 2013.



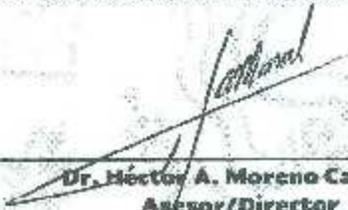
DR. JOSE LUIS MEZA MEDINA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

Por medio de la presente, hacemos de su conocimiento que después de haber sometido a revisión el trabajo de tesis titulado:

**"Diseño e implementación del sistema de instrumentación
de un destilador solar de alto rendimiento"**

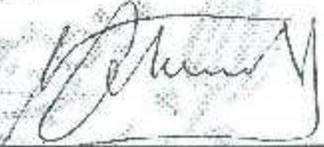
Desarrollado por la **C. SARA OLIVIA GARCIA DIAZ**, con número de control **M02130887** y habiendo cumplido con todas las correcciones que se le indicaron, estamos de acuerdo que se le conceda la autorización de la fecha de examen de grado para que proceda a la impresión de la misma.

ATENTAMENTE
EDUCACIÓN TECNOLÓGICA FUENTE DE INNOVACIÓN


Dr. Héctor A. Moreno Casillas
Asesor/Director


Dr. Francisco G. Flores García
Coesesor

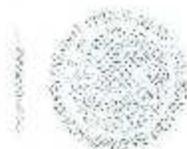

Dr. Francisco Valdés Perezgasga
Comité Tutorial


M.C. Martín Vázquez Rueda
Comité Tutorial



SEP

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



DIRECCIÓN GENERAL DE EDUCACIÓN SUPERIOR TECNOLÓGICA
Instituto Tecnológico de la Laguna



"2013: Año de la Lealtad Institucional y Centenario del Ejército Mexicano"

Torreón, Coah. **16/ Diciembre/2013**

Dependencia: DEPI

Oficio: DEPI/391/2013

Asunto: Autorización de
impresión de tesis.

C. SARA OLIVIA GARCIA DIAZ
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA.
PRESENTE

Después de haber sometido a revisión su trabajo de tesis titulado:

**"Diseño e implementación del sistema de instrumentación
de un destilador solar de alto rendimiento"**

Habiendo cumplido con todas las indicaciones que el jurado revisor de tesis hizo, se le comunica que se le concede la autorización con número de registro **RIITEC: (20)-TMCIE-2013**, para que proceda a la impresión del mismo.

ATENTAMENTE
EDUCACIÓN TECNOLÓGICA FUENTE DE INNOVACIÓN


DR. JOSÉ LUIS MEZA MEDINA
Jefe de la División de Estudios de Posgrado e Investigación
del Instituto Tecnológico de la Laguna


SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA
INSTITUTO TECNOLÓGICO
de la Laguna
División de Estudios de Posgrado
e Investigación



Dedicatoria

A tu amor y tu paciencia. Por todo tu sacrificio para que yo pudiera seguir adelante, me motivaste siempre a ser mejor. ahora puedo decir que esta tesis tiene mucho de ti, gracias por permanecer a mi lado, hombro con hombro. Gracias por tu apoyo y aliento cada día, gracias por ese tiempo que has tenido que sacrificar para que yo pudiera cumplir con mi labor. Va para ti amor de mi vida. va para ti Rodrigo.

Con todo mi amor para esas dos personas que lo dieron todo para que yo pudiera lograr mis sueños, para que yo pudiera llegar hasta aquí: mis amados padres Juanis y Ramón. A ustedes les debo todo lo que soy ahora, mi educación y formación en cada aspecto de mi vida, por eso y mucho más, esta tesis va dedicada también a ustedes, que han sido el mayor ejemplo de fortaleza y amor en mi vida.

Ramón, hermano, gracias porque siempre me has apoyado sin importar tiempo ni lugar, siempre sin condiciones. Gracias también a mi hermana Celina, quien por 18 años fue mi compañera de juegos, travesuras y aventuras; cuya trayectoria de vida, ha sido mi inspiración y motivación durante estos 9 años que han transcurrido desde su partida. Ramón Gerardo y Celina, hermanos, este trabajo lo dedico también a ustedes, mis mejores amigos, uno aquí en la tierra y una en el cielo; es también de ustedes porque han sido mis cómplices incondicionales en cada aventura emprendida.

No olvido a mis dos ángeles, quienes me vieron iniciar este reto pero que ya no están aquí para verme culminarlo. Quiero hacer una última dedicatoria a la memoria de mi abuelita Amparo, mujer abnegada que supo dar amor a su paso como nadie más, y al Ing. Francisco Javier Muñoz Villalobos, mi querido "Tío Pancho", quien me mostró por primera vez el mundo de la ingeniería, hace mucho tiempo, cuando yo aún era una niña. Donde quiera que se encuentren, mi admiración y cariño para ustedes.

Agradecimientos

Primeramente, agradezco a Dios, por todas las bendiciones que ha derramado sobre mi vida y la de mi familia.

Gracias a mi esposo Rodrigo Carreón, a mis padres, a mis hermanos y a toda mi familia.

En especial, gracias a mi asesor Dr. Héctor A. Moreno Casillas, por su labor de asesoría tan profesional, la admirable vocación demostrada, por tantos conocimientos y experiencias compartidas durante estos más de 2 años, así como a mi co-asesor Dr. Francisco Flores García por su cabal asesoría y sus amables consejos para el desarrollo de este proyecto. Mi respeto, mi admiración y mi más sincero agradecimiento para ambos por el apoyo brindado en las difíciles situaciones personales que viví en el último año, parte del tiempo que he estado bajo su tutela. Valoro sobre manera la paciencia y la comprensión que me ofrecieron en esos momentos.

Gracias a mis maestros Dr. Francisco Valdés Perezgasga, M.C. Martín Gerardo Vázquez Rueda, M.C. Sergio Federico Salas Huerta, M.C. Juan Sifuentes Mijares, Dr. Enrique Cuan Durón y Dr. Víctor Manuel Cabrera Morelos por los conocimientos compartidos.

Gracias al Ing. Alejandro Romero Barrientos, por su apoyo en las actividades de fabricación e instalación del equipo. Sin duda una labor esencial para el logro de este proyecto.

Gracias al equipo de trabajo del Ing. José de Jesús Pámanes García de la carrera de Ingeniería Mecánica de este instituto por su aportación valiosísima al

proyecto con el diseño y fabricación del colector solar para la etapa de precalentamiento del agua de alimentación.

Gracias al Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología CONACYT, por el recurso otorgado a través del FONCYT para el desarrollo de este proyecto. Así como al Promep, por los recursos económicos concedidos al Instituto Tecnológico de la Laguna, con los que se adquirieron materiales fundamentales para el desarrollo del proyecto.

Quiero agradecer profundamente al Ing. Jesús Gerardo Serrano por brindarme su sincero apoyo a nivel profesional y también personal a lo largo de este ciclo. Finalmente, y no con menos importancia, agradezco a mis compañeros de generación de maestría, Jennifer Castillo y Ariel Lazalde, con quienes además de haber formado un excelente equipo de trabajo, en el cual aprendimos y crecimos juntos académicamente en estos años, también formamos un estrecho lazo de amistad que velaré por conservarlo siempre.



Resumen

En el Instituto Tecnológico de la Laguna se ha utilizado un destilador solar desde 1987, con una producción de 30 litros por día (lpd), ha surtido de agua desmineralizada a sus laboratorios. El número de alumnos y equipos que utilizan agua destilada ha aumentado y la demanda también.

El objetivo es analizar los datos obtenidos de la experiencia de uso del equipo para diseñar y construir un destilador solar incorporando mejoras que permitan aumentar la producción y con el que se puedan realizar estudios avanzados de destilación solar. Se busca diseñarlo como módulo, para poder acoplar dos o más unidades; incluir en el diseño paredes desmontables; precalentamiento de agua, operación automática, monitoreo de las variables principales del proceso (presión, conductividad eléctrica, temperatura y nivel) y registro en computadora de las mismas. El equipo propuesto es tipo "dos vertientes". No genera costos salvo la inversión inicial y su impacto ambiental es positivo. Se fomenta el uso de las energías renovables y favorece la vinculación con las empresas locales como Met-Mex Peñoles.

Abstract

At the Instituto Tecnológico de la Laguna (ITL) a solar still has been in use since 1987, with an output of 30 liters per day of demineralized water. It has supplied with distilled water all of ITL's chemistry labs. Number of alumni and equipment that use distilled water has increased and so has the demand.

The aim is to analyze the information obtained from the experience in using a solar still for more than 20 years, to design and build a solar distiller incorporating improvements that could increase production, and pursue advanced studies about solar distillation. It was designed as a module that could be coupled to two or more units, with removable walls, a stage of preheating of feed water, automatic operation, monitoring of the main process variables (pressure, electrical conductivity, temperature and level) and computer registration thereof. The proposed device is a "two sides" type. It doesn't generate costs, but the initial investment and its environmental impact is positive. It encourages the use of renewable energy and promotes links with a local industry.

Índice General

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Justificación	6
1.2. Planteamiento del problema	8
1.3. Objetivos	10
1.3.1. Objetivo general del proyecto	10
1.3.2. Objetivos específicos.....	11
1.4. Definición del proyecto.....	12
1.4.1. Naturaleza y descripción.	12
1.4.2. Análisis FODA	14
1.4.2.1. Fortalezas	14
1.4.2.2. Oportunidades	14
1.4.2.3. Debilidades	15
1.4.2.4. Amenazas	15
1.5. Metodología	15
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	17
2.1. El Agua	17
2.1.1. Conductividad del Agua.....	18
2.1.2. Energía Solar.....	19
2.1.3. Radiación Solar	20
2.1.4. Variabilidad de la radiación solar en Torreón, Coahuila.	22
2.1.5. Tipos y usos de la energía solar.....	26
2.1.6. Sistemas de Aprovechamiento de la Energía Solar	27

2.2.	Destilación Solar	28
2.3.	Tipos de Destiladores	29
2.3.1.	Destilador solar de una vertiente o tipo Batea	30
2.3.2.	Destilador tipo Batea multiefecto	31
2.3.3.	Destilador solar de dos vertientes	32
2.3.4.	Destilador Solar tipo Cascada	33
2.3.5.	Destilador Solar tipo esférico de barredera	33
2.3.6.	Destilador Solar Multietapa.....	35
2.4.	Colectores Solares.....	35
2.5.	Sensores.....	36
2.5.1.	Tipos de sensores	37
2.5.1.1.	Sensores Ultrasónicos (Nivel).....	37
2.5.1.2.	Sensores de Presión.....	38
2.5.1.3.	Sensores de Temperatura	39
2.5.1.4.	Sensor de conductividad	41
2.6.	Electrónica Analógica.....	42
2.6.1.	Acondicionadores de señal.....	42
2.6.2.	Fuentes de Alimentación.....	43
2.7.	Electrónica Digital	46
2.7.1.	Microcontroladores	46
2.7.2.	Tarjeta de desarrollo Arduino	48
2.7.3.	Comunicación de datos	49
2.7.3.1.	RS-232.....	49
2.8.	Lógica difusa.....	51
2.8.1.	Conjuntos Difusos	51
2.8.2.	Funciones de Pertenencia	52

2.8.3. El Controlador Difuso.....	53
2.8.4. Fusificación.....	54
2.8.5. Base de Conocimiento.....	54
2.8.6. Inferencia.....	54
2.8.7. Defusificación.....	54
2.8.7.1. Calculo del centroide.....	54
CAPITULO 3. METODOLOGÍA.....	56
3.1. Diseño y fabricación del destilador solar de alto rendimiento.....	56
3.1.1. Diseño del destilador.....	56
3.1.1.1. Diseño del Colector Solar Plano como etapa de precalentamiento.....	60
3.1.1.2. Diseño de bases y estructuras para montaje de sensores.....	61
3.1.1.3. Ruteo virtual para cableado y canalización.....	63
3.1.2. Proceso de fabricación.....	64
3.1.2.1. Fabricación de la estructura del destilador solar.....	64
3.1.2.2. Fabricación del colector solar para etapa de precalentamiento.....	67
3.1.3. Instalación.....	70
3.2. Diseño e implementación del sistema de instrumentación y control.....	76
3.2.1. Hardware.....	76
3.2.1.1. Sensores ultrasónicos de nivel.....	77
3.2.1.2. Sensores de temperatura.....	81
3.2.1.3. Sensor de presión.....	83
3.2.1.4. Sensor de conductividad.....	84
3.2.1.5. Válvulas solenoides (Actuadores del sistema).....	85
3.2.1.6. Fuente de alimentación.....	86
3.2.1.7. Tarjeta de desarrollo Arduino MEGA 2560 para el control del sistema de instrumentación.....	87
3.2.1.8. Etapa de acondicionamiento de señales.....	91
3.2.1.8.1. Convertidor activo, tridireccional.....	93

3.2.1.9. Canalización y cableado del sistema de instrumentación.....	94
3.2.1.9.1. Armado de gabinetes.....	97
3.2.2. Software.....	99
3.2.2.1. Software Arduino.....	99
3.2.2.1.1. Programación en Arduino.....	100
3.2.2.1.2. Programación del control del sistema de instrumentación.....	100
3.2.2.1.3. Programación de la comunicación serial con la interface de monitoreo de variables en LabView.....	102
3.2.2.1.4. Desarrollo del algoritmo de lógica difusa para control de purga.....	104
3.2.2.2. Software LabVIEW 2012.....	120
3.2.2.2.1. Interface de control y monitoreo.....	122
3.2.2.2.2. Manipulación de variables.....	125
CAPITULO 4. RESULTADOS.....	126
4.1. Fabricación de un destilador solar de alto rendimiento.....	126
4.2. Funcionamiento.....	127
4.3. Sistema de monitoreo y manipulación de las variables del proceso.....	130
4.4. Pruebas de los sensores en campo.....	131
4.5. Publicaciones y participación en congresos.....	135
CONCLUSIONES.....	138
Trabajo a futuro.....	140
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	142
ANEXOS.....	146

I.	Layout del sistema Destilador Solar de Alto rendimiento	146
II.	Layout del sistema Destilador Solar de Alto rendimiento	147
III.	Plano de despiece de destilador solar de alto rendimiento	148
IV.	Plano de estructura soporte	149
V.	Plano de charola destilador solar	150
VI.	Plano detalle de cárcamo para purga en charola	151
VII.	Plano detalle de soporte de cubierta transparente	152
VIII.	Plano detalle de ensamble de soportes de cubierta transparente	153
IX.	Plano detalle de ensamble de charola destilador solar	154
X.	Plano detalle de fabricación tapas laterales destilador solar	155
XI.	Plano detalle de cortes para cubierta de madera y vidrios	156
XII.	Plano despiece de sistema de colector solar plano	157
XIII.	Plano detalle armado de estructura colector solar plano	158
XIV.	Plano detalle de fabricación colector solar plano	159
XV.	Plano detalle fabricación de caja y serpentín colector solar	160
XVI.	Plano detalle de base para tanque de almacenamiento diario	161
XVII.	Plano tubería principal de alimentación (línea agua cruda)	162
XVIII.	Plano tubería agua destilada (línea agua producto)	163
XIX.	Plano detalle tubería agua destilada (línea agua producto)	164

XX.	Plano detalle U tubería agua destilada (línea agua producto)	165
XXI.	Plano tubería tanque de almacenamiento diario a tanque de almacenamiento general.....	166
XXII.	Plano tubería de agua residual (línea de purga)	167
XXIII.	Plano detalle tubería de agua residual (línea de purga).....	168
XXIV.	Ubicación de los elementos de instrumentación (sensores y actuadores).	169
XXV.	Plano detalle de base para sensor de nivel de agua en charola destilador solar.	170
XXVI.	Plano canalización y cableado del sistema de instrumentación.....	171
XXVII.	Plano detalle de canalización y cableado del sistema de instrumentación.	172
XXVIII.	Plano detalle de canalización y cableado del sistema de instrumentación.	173
XXIX.	Plano distribución de gabinetes eléctricos de control.....	174
XXX.	Diagrama de bloques conexiones eléctricas de elementos del sistema de instrumentación.....	175
XXXI.	Diagrama esquemático de la tarjeta de acondicionamiento de señales de sensores.	176

Índice de Figuras

Figura 1.1. Destilador solar instalado en el Tecnológico de la Laguna, año 2002.....	9
Figura 2.2. Destilador solar instalado en el Tecnológico de la Laguna, año 2008.....	10
Figura 3.3. Destilador de dos vertientes la cubierta puede ser de dos aguas o de bóveda.....	13
Figura 2.1. Ángulos que definen la posición del sol.....	21
Figura 2.2. Ubicación de la ciudad de Torreón, Coahuila en el mapa de la República Mexicana con división política. Disponible en http://turismo.torreon.gob.mx/torreon.cfm	23
Figura 2.3. Radiación global media diaria en la República Mexicana. Fuente: Servicio Meteorológico Nacional. Ing. Manuel Muñoz Herrera.....	24
Figura 2.4. Destilador solar de una vertiente o tipo Batea. Efecto Simple.....	30
Figura 2.5. Destilador Solar tipo Batea Multiefecto.....	32
Figura 2.6. Destilador de dos vertientes la cubierta puede tener forma de dos aguas o de bóveda.....	32
Figura 2. 7. Destilador solar tipo cascada.....	33
Figura 2.8. Destilador solar tipo Barredora.....	34
Figura 2.9. Esquema de un colector solar plano.....	36
Figura 2.10. Diagrama a bloques de fuente de alimentación lineal.....	44
Figura 2.11. Diagrama a bloques de fuente de alimentación conmutada.....	45
Figura 2.12. Numeración de terminales de los conectores DB9 hembra y macho	50
Figura 2.13. Grafica de las funciones de pertenencia a un conjunto difuso.....	52
Figura 2.14. Función de transferencia para un conjunto difuso triangular.....	52
Figura 2.15. Función de transferencia para un conjunto difuso trapezoidal.....	53
Figura 2.16. La estructura de un controlador difuso.....	53
Figura 3.1. Diagrama de flujo del proceso de construcción del destilador solar de alto rendimiento.....	56
Figura 3.2. Modelo 3D del destilador solar de alto rendimiento.....	57

Figura 3.3. Diseño en SolidWorks de la charola del destilador solar de alto rendimiento (a) Dimensiones generales, (b) Diseño que incluye cárcamo para facilitar la purga del sistema.....	58
Figura 3.4. Diseño en SolidWorks de la estructura que soportará la charola del destilador solar.....	58
Figura 3.5. Modelo 3D de la distribución de los soportes para la cubierta de vidrio del destilador solar y recubrimiento de madera para evitar corrientes de aire bajo la charola.....	59
Figura 3.6. Modelo 3D de la distribución de los soportes para la cubierta de vidrio del destilador solar.....	59
Figura 3.7. Diseño en SolidWorks del colector solar plano utilizado para el precalentamiento de agua de alimentación.....	61
Figura 3.8. Diseño en SolidWorks de la base para sensor ultrasónico de nivel de agua en la charola (Izquierda) y la forma de montaje de los sensores de temperatura de la entrada y la salida de agua del colector solar.....	62
Figura 3.9. Ruteo virtual del cableado y canalización de sensores y actuadores.....	64
Figura 3.10. Etapa de corte y ensamble de charola del destilador solar.....	66
Figura 3.11. Charola y estructura de soporte en etapa de construcción.....	67
Figura 3.12. Soportes y cubierta transparente.....	68
Figura 3.13. Conexiones de tubería y sensores.....	69
Figura 3.14. Proceso de fabricación de colector solar plano. Corte y ensamble de caja base.....	70
Figura 3.15. Proceso de fabricación de colector solar plano, etapa de ensamble del serpentín de cobre y la base de aluminio con la caja base.....	71
Figura 3.16. Prototipo terminado del colector solar plano.....	72
Figura 3.17. Ubicación y orientación del destilador solar de alto rendimiento.....	72
Figura 3.18. Instalación de tubería de agua destinada y tubería de purga.....	73
Figura 3.19. Instalación de tubería de alimentación de agua cruda.....	74
Figura 3.20. Bajada de tubería de agua destilada y purga, y bypass de en la línea de agua destilada para la habilitación o deshabilitación de U barométrica.....	75

Figura 3.21. Instalación de válvula solenoide en línea de purga.	76
Figura 3.22. Instalación tanques de almacenamiento en el interior del edificio.	76
Figura 3.23. A (Izquierda): Instalación aislante térmico debajo de la charola. B (Derecha): Cubierta de madera para cubrir el sistema de las corrientes de aire.	77
Figura 3.24. Instalación de la etapa de precalentamiento del agua de alimentación (colector solar plano).	78
Figura 3.25. Ubicación de sensores y actuadores del sistema de instrumentación del destilador solar.	80
Figura 3.26. Dimensiones del sensor de proximidad ultrasónico 873P.	81
Figura 3.27. Montaje de base y sensor de nivel de agua en charola.	82
Figura 3.28. Montaje de sensor de nivel de agua destilada en tanque de almacenamiento diario.	83
Figura 3.29. Dimensiones aproximadas del interruptor de temperatura sin pantalla 837E [mm (in)].	83
Figura 3.30. Sensores de temperatura de entrada (1) y temperatura salida (2) del colector solar plano.	84
Figura 3.31. Sensor de temperatura del agua en charola de destilador solar.	85
Figura 3.32. Sensor de presión marca PMC.	86
Figura 3.33. Montaje de sensor de presión en estructura de charola.	86
Figura 3.34. Base con electrodos con recubrimiento reutilizada en el sensor de conductividad eléctrica desarrollado para la aplicación.	87
Figura 3.35. A. (Izquierda) Válvula solenoide en línea de purga de charola. B (Derecha) Válvula solenoide instalada en tubería que une tanque de almacenamiento diario con tanque general.	88
Figura 3.36. Fuente de alimentación marca Allen Bradley montada en gabinete eléctrico.	89
Figura 3.37. Tarjeta de desarrollo Arduino MEGA 2560.	90
Figura 3.38. Configuración de los pines de la placa Arduino MEGA 2560.	91
Figura 3.39. Diagrama de conexiones eléctricas del sistema de instrumentación.	93

Figura 3.40. Diagrama esquemático de la tarjeta de acondicionamiento de señales. A) Conversión 4-20 mA a 0-5V. B) Conversión 0-10V a 0-5V. C) Alimentación de la tarjeta.....	94
Figura 3.41 Diagrama esquemático del circuito de conversión de señal 4-20 mA a señal analógica 0-5V.....	95
Figura 3.42 Diagrama esquemático del circuito de conversión de señal analógica 0 a 10 V a 0-5 V.....	95
Figura 3.43 Fabricación de la tarjeta de acondicionamiento de señales.	96
Figura 3.44 Convertidor activo tridireccional para convertir 4 a 20 mA A 0 -10V.....	96
Figura 3.45. Cableado y canalización del sistema de instrumentación.....	98
Figura 3.46. Etapa de instalación de tubería eléctrica planta alta.....	98
Figura 3.47. Etapa de instalación de tubería eléctrica y gabinetes de control planta baja.....	99
Figura 3.48. Instalación final de tubería y cableado eléctrico.....	100
Figura 3.49. Layout de gabinetes de control del sistema.....	101
Figura 3.50. Gabinetes de control del sistema de instrumentación en etapa de ensamble.....	102
Figura 3.51. Icono de acceso directo del software Arduino.....	102
Figura 3.52. Entorno de trabajo del software Arduino.....	103
Figura 3.53. Grafica de la función de pertenencia de la variable nivel de agua en charola.....	108
Figura 3.53. Grafica de la función de pertenencia de conductividad eléctrica del agua en charola.....	110
Figura 3.54. Grafica de la función de pertenencia de la variable nivel de agua destilada en tanque diario.....	111
Figura 3.55. Grafica de las expresiones que resumen las reglas de inferencia.....	113
Figura 3.56. Grafica de defusificación de la salida.....	115
Figura 3.57. Entorno LabView para la creación de un nuevo proyecto.....	122
Figura 3.58. Agregar un nuevo VI al proyecto existente.....	122

Figura 3.59. Visualización del árbol del proyecto generado para la interface de monitoreo de las variables del proceso del destilador solar de alto rendimiento.....	123
Figura 3.60. Indicadores numéricos agregados en el panel frontal de la interface de monitoreo.....	124
Figura 3.61. Parte del código en el Diagrama de Bloques para la comunicación serial.	125
Figura 3.62. Secuencia de inicio para la recepción de los datos desde Arduino.	125
Figura 3.64. Controles booleanos para la operación manual de las electroválvulas.	127
Figura 3.65. Código para la operación manual de las electroválvulas.....	127
Figura 4.1. Destilador Solar de Alto Rendimiento instalado en el ITL.....	128
Figura 4.2. Tanques de almacenamiento de agua destilada y tableros de control. ..	129
Figura 4.3. Grafica de conductividad de agua producto, producción de agua destilada y porcentaje de eficiencia.	131
Figura 4.4. Pantalla principal de la interface de monitoreo y manipulación de variables.	132
Figura 4.5. Pantalla de manipulación de actuadores del sistema.	133
Figura 4.6. Reconocimiento de participación ENIT 2013.	138
Figura 4.7. Reconocimiento Primer Lugar.	138
Figura 4.8. Reconocimiento de participación CIM2013, Orizaba, Veracruz.....	139

Capítulo 1. Introducción

Agua destilada es aquella a la que se le han eliminado las impurezas e iones mediante la separación de los componentes líquidos de una mezcla. La conductividad del agua destilada es casi nula (dependiendo del grado de destilación) pues a diferencia del agua de grifo común, carece de muchos iones que producen la conductividad, tales como cloruros, magnesio y fluoruros [1].

La desalación del agua puede realizarse por medio de diversos procedimientos, entre los que se destacan los siguientes: Ósmosis inversa, congelación, evaporación relámpago, formación de hidratos y destilación. Los requerimientos energéticos de la desalación varían en función de la tecnología empleada, aunque hay una tendencia hacia su reducción, gracias a los avances tecnológicos.

La desalinización por ósmosis inversa se alcanza al hacer pasar el agua que se va a tratar a través de membranas, donde las partículas del agua son retenidas o permeadas en función de su tamaño físico una vez que pasan por varias etapas de filtrado. Para ello se aplican diferencias de presión moderadas. Todo el sistema es mecánico y requiere energía eléctrica. Son comunes las incrustaciones en la superficie de la membrana lo que aumenta la resistencia al flujo de permeado y disminuye su eficiencia. Requiere inyección de aire permanente para evitar dichas incrustaciones. Es difícil determinar costos para estos equipos, pues dependen del país y de la comunidad en donde se han de instalar. En todos los casos, esos costos son considerados altos y como regla general se calculan costos de capital para la ósmosis inversa en ocasiones hasta casi \$1,000.00 US/m³ de agua a tratar [2]. Empleando el proceso de ósmosis inversa y contando que el líquido producto debe ser bombeado a los lugares de destino, el gasto energético es de entre 3 y 4 kWh/m³ [3].

En la desalación por congelación se forman unos cristales de hielo que se separan y se lavan y así se obtiene el agua dulce. Mientras que mediante evaporación relámpago, gotas de agua se introducen en una cámara a presión baja y se convierten inmediatamente en vapor, que son posteriormente condensadas, obteniendo agua desalada. El agua residual somete a presiones más bajas y mediante el mismo proceso se obtiene más agua desalada. Este proceso se repetirá, hasta que se alcancen los valores de desalación deseados.

La desalación mediante formación de hidratos que son moléculas de hidrógeno con algún metal. Este método no se utiliza a gran escala.

Electrodiálisis consiste en el fenómeno mediante el cual, si se hace pasar una corriente eléctrica a través de una solución iónica, los iones positivos (cationes) migrarán hacia el electrodo negativo (cátodo); mientras que los iones negativos (aniones) lo harán hacia el electrodo positivo (ánodo). Si entre ambos electrodos se colocan dos membranas semipermeables que permiten selectivamente solo el paso del Na^+ o del Cl^- , el agua contenida en el centro de la celda electrolítica se desaliniza progresivamente, obteniéndose agua dulce.

Estos sistemas presentan costos considerables que van de \$1,000.00 US en más. El costo final depende del tamaño, del caudal a desinfectar y de los equipos auxiliares. En lo que respecta al costo de operación además del costo de las membranas debe considerarse el costo de la energía eléctrica. Los costos de producción y mantenimiento son altos, porque los electrodos necesarios se desgastan relativamente rápido [4].

La desalación por destilación se realiza mediante varias etapas, en cada una de las cuales una parte del agua salada se evapora y se condensa en agua dulce. Es una técnica costosa energéticamente pero que es común en lugares donde no hay

una fuente de agua potable asequible o el agua que se puede obtener no es apta para consumo.

La destilación es un proceso físico de separación que se basa en los diferentes puntos de ebullición de los compuestos, en el que se evapora parcialmente una mezcla de productos, de forma que los compuestos más ligeros se concentran en la fase vapor y los más pesados se concentran en la fase líquida.

La destilación solar se presenta como una alternativa atractiva para producir agua potable y el uso de los destiladores solares ha recibido considerable atención a partir de 1960 en muchos países y además es de esperar que este interés aumente rápidamente en los próximos años [5].

3.8×10^{24} joules de radiación solar son absorbidos por la tierra y la atmósfera por año. La energía solar donde la atmósfera entra en contacto con el sol es de 1017 watts y la demanda total es de 1013 watts. Por lo tanto el sol nos proporciona 1000 veces más energía de la que requerimos. Si se usara el 5% de esta energía, sería 50 veces lo que el mundo requerirá. La energía radiada por el sol en un día soleado es de 4 a 7 KWh / m² [6].

El sistema de destilación solar de agua puede purificar de manera efectiva el agua de mar e incluso aguas negras. Los destiladores solares pueden remover efectivamente sales y minerales (Na, Ca, As, Fe, Mn), bacterias como E.coli, Cholera y Botulinus, parásitos, metales pesados y sólidos disueltos totales (TDS) [6].

El principio de destilación solar sigue el mismo principio que el ciclo del agua, empezando por un calentamiento del agua del estanque o depósito debido a la radiación solar que llega a su superficie a través de los cristales o lámina transparente que se destine como cubierta. Esto provoca la evaporación del agua, en la cual se eliminan las sales iónicas que contiene. Después el vapor se condensa en

los cristales y se deslizan en forma de gota hacia los canales de recuperación de destilado, para después llevarlos a través de tubería hacia los contenedores o tanques de almacenamiento.

Existen varios diseños de destiladores. El más simple es el destilador de "dos vertientes" que consiste en una caseta de vidrio a dos aguas, con una inclinación de alrededor de 20° o 30° con respecto a la horizontal.

La radiación solar incide en el interior del destilador y provoca que el agua salada eleve su temperatura, las altas temperaturas provocan la evaporación y la atmósfera en el interior del destilador se vuelve muy húmeda, el ambiente se satura de humedad lo que provoca que el agua evaporada se condense al contacto con la superficie interior del vidrio, las gotas de condensación se acumulan y empiezan a deslizarse por la propia inclinación de los vidrios hacia la parte inferior, los canales en los costados de la charola recogen el agua dulce destilada que se ha deslizado. En este modelo la captación de energía solar es más eficiente ya que no existen paredes que puedan proyectar sombras al interior de la caja. Por lo general este es un destilador solar de gran tamaño con geometría triangular.

Según la Asociación Internacional de Desalación (IDA), la capacidad mundial de desalación contratada ha aumentado notablemente durante los últimos 2 años, alcanzando los 77,4 millones de metros cúbicos por día. Esto significa un total de casi 16.000 plantas de desalación instaladas alrededor de todo el mundo [7]. La desalación del agua por vía solar es una práctica bien conocida en el mundo. Los equipos utilizados para este tipo proceso son llamados destiladores solares, y son objeto de estudio y análisis para el diseño de una estructura que logre resultados de destilación convenientes para su posterior aplicación al interior del Instituto Tecnológico de la Laguna (ITL).

La calidad del agua producto determina el uso que se le puede dar en diferentes ámbitos. Es importante resaltar que la eficiencia de los destiladores dependerá de los materiales con los que se construyan.

En los países centro y sur-americanos, los destiladores solares se han venido desarrollando y aplicando como una alternativa potencial para el abastecimiento de agua en zonas con altos niveles de radiación solar. Se ha observado que son las universidades las instituciones que han servido de nicho para el estudio de estos equipos. Por citar algunos desarrollos tecnológicos recientes, cuyas características de construcción y aplicación son similares al equipo que la presente investigación propone, se mencionan los siguientes: en octubre de 2011 la Facultad de Ingeniería de la UNNE en Buenos Aires Argentina dio a conocer un equipo destilador solar de agua para el Instituto de Microbiología y Zoología Animal (IMyZA) del INTA Castelar, de la Provincia de Buenos Aires; a partir de un acuerdo de cooperación con el Grupo de Investigación y Desarrollo de Energías Renovables (GIDER) de dicha universidad [8], mientras que en la Universidad de El Salvador se presenta como trabajo de investigación en el año 2012 un proyecto que incluye el diseño, construcción y validación de un destilador solar para uso en los laboratorios de la planta piloto de la escuela de ingeniería química donde se avala que el equipo es factible de utilizarse para surtir los laboratorios[9].

La Comarca Lagunera es un lugar privilegiado para el aprovechamiento de la energía solar, debido a su conveniente radiación solar representa una alternativa potencial para el abastecimiento de agua, que es un problema creciente en esta región desértica. En los últimos años en la región lagunera se han realizado proyectos de mejoramiento en el abastecimiento de agua, como eliminar arsénico por ejemplo y que es responsable de muchas de las enfermedades de la población. Además del interés de promover la investigación y la vinculación con la industria, el ITL busca también promover tecnologías verdes y el uso de energías renovables que minimicen el impacto ambiental y disminuyan el efecto invernadero.

1.1. Justificación

El agua desmineralizada es importante no únicamente para los análisis de laboratorio, también tiene uso en la fabricación de soluciones, en la reposición de agua en baterías, para planchas domésticas e industriales, para la generación de vapor a micro, pequeña y gran escala. El agua desmineralizada o destilada se produce con diferentes equipos tales como evaporadores, plantas desmineralizadoras, plantas de osmosis inversa, por electrodiálisis, etc. Todos estos métodos requieren de energía. La desmineralizadora además requiere de productos químicos peligrosos como la sosa caustica y ácido sulfúrico que demandan de grandes tanques de almacenamiento y de resinas de intercambio iónico, estos productos son caros. La osmosis inversa además requiere de equipos costosos que trabajan a altas presiones, y las membranas utilizadas en el proceso no tienen una vida muy larga y también son muy caras.

En el ITL se ha venido utilizando un destilador solar desde 1987, el cual ha surtido de agua desmineralizada para análisis químicos a los laboratorios de la carrera de Ingeniería Química, al Centro Integrado de Manufactura (CIM) y al Laboratorio de Ingeniería Mecánica, también en ocasiones al CONALEP. El material de construcción del destilador ha cambiado, inicialmente la charola era de fibra de vidrio, después se cambió a lámina galvanizada y actualmente es de acero inoxidable, es el material que ha dado mejores resultados. Además del cambio de material también se han hecho cambios en el diseño lo que ha permitido subir la producción de 8 litros por día (lpd) a 30 lpd. El agua desmineralizada es requerida en todos los laboratorios de análisis cuantitativo por lo que la demanda ha venido en aumento, por ello surge la necesidad de crecer la producción.

Se buscó entonces, analizar los datos obtenidos de la experiencia de uso del destilador solar existente y sus modificaciones para luego tomar decisiones en el diseño y construcción de un nuevo destilador solar incorporando mejoras como

operación automática, monitoreo de variables del proceso (temperatura, conductividad eléctrica y nivel), purga automática, alarmas de fallas y etapa de precalentamiento que permitieran subir la producción con las mismas dimensiones y que además prevenga todos los inconvenientes que se habían presentado en los 20 años de operación.

El destilador solar que se propone requiere únicamente de la energía solar para el proceso, se propone una fuente de alimentación auxiliar pero de bajo consumo para alimentar el equipo de sensores y registro.

El impacto social de este proyecto se refleja, principalmente, para la totalidad de los alumnos de la carrera de ingeniería química del ITL que cuenta con aproximadamente 500 estudiantes, y tal vez en un menor número de estudiantes de las carreras ingeniería mecánica e Industrial, quienes se verán beneficiados por el agua desmineralizada disponible para los análisis, prácticas y pruebas que se llevan a cabo en los laboratorios del ITL. Además, la comunidad estudiantil en general se vería beneficiada al tener un equipo que opera con energía solar como motivación para continuar investigando más usos.

El proyecto impacta tecnológicamente al pretender diseñar un destilador solar que incorpore mejoras, resultado de la experiencia de 20 años en la operación de un equipo similar y buscar patentarlo.

El costo de producción del agua desmineralizada en la región es de 43.43 pesos por metro cúbico, datos proporcionados en la Central Termoeléctrica de Lerdo CFE. A este precio se le adicionan costos por energía eléctrica y mano de obra. La producción de agua en el destilador solar que se propone, no genera costos salvo la inversión inicial.

El impacto ambiental es positivo, ya que en lugar de energía proveniente de combustibles fósiles estaría utilizando energía solar, y no estaría utilizando productos químicos riesgoso para el ambiente, tampoco produciría residuos que no son degradables. El impacto medioambiental se reduce a la cantidad de energía consumida y de emanaciones de gases de efecto invernadero generados durante la fabricación de los materiales que integran los equipos.

1.2. Planteamiento del problema

El destilador solar que abastecía de agua destilada a los laboratorios de análisis del ITL, venía funcionando desde 1987. Se trataba de un destilador solar de dos vertientes con dimensiones aproximadas de 6 m x 1.5 m con una charola de 20 cm de altura ubicado en la azotea del edificio 12 del Instituto Tecnológico de la Laguna donde se encuentran los laboratorio de química analítica. Sufrió algunos mantenimientos mayores, el último en 1997 en el cual se reparó la charola de fibra de vidrio se hizo cambio de membrana y del aislamiento térmico, pero a partir del año 2000 se presentaron algunos problemas como fugas de la charola del destilador debida a la compresión y deformación del aislamiento de nieve seca por el peso de la charola de fibra de vidrio y del agua, reportes de alta conductividad del destilado por la obstrucción de la línea de purga y la acumulación de sales en el agua de la charola y baja producción de agua destilada por fallas en el sello en juntas de vidrios del destilador.

Se llevó a cabo una remodelación del Destilador Solar en el año 2002, que incluía el cambio de la charola y canaletas de fibra de vidrio por lámina galvanizada, instalación de sistema de purga, instalación de soportes para la charola y para el aislamiento térmico y sellado de juntas. El destilador puede observarse en la figura 1.1.

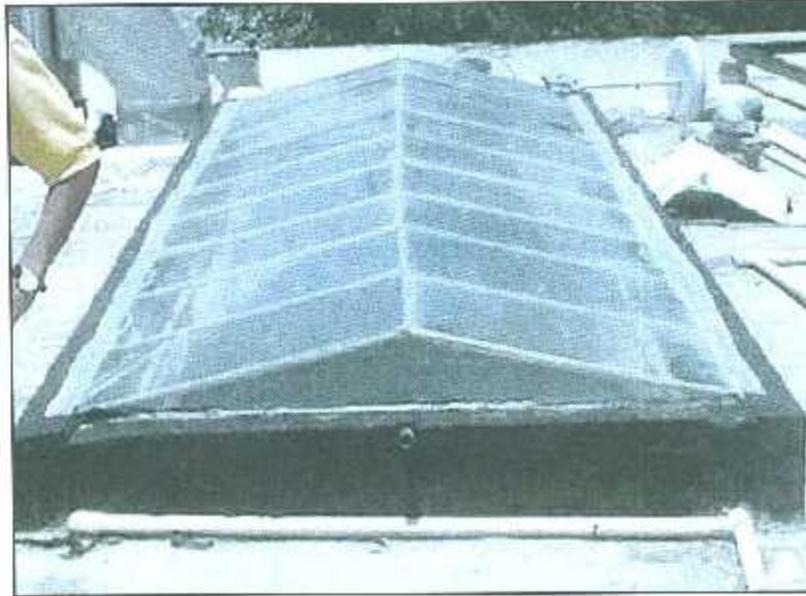


Figura 1.1. Destilador solar instalado en el Tecnológico de la Laguna, año 2002.

La producción aumentó a 30 litros por día o 2.4 litros por m²al día. En los siguientes años se observó la formación de escamas de sales en la charola, fuga en la línea de alimentación y corrosión en las canaletas de lámina galvanizada. Para el año 2007 el material de la charola se cambió a lámina de acero inoxidable y se fabricó una nueva estructura con perfiles acero comercial para montar la charola sobre ella, de manera que ya no quedara descansando sobre la superficie del techo del laboratorio.

En el año 2008 se instalaron nuevos vidrios y el sellado de la estructura con silicón, se hizo una instalación de las líneas de alimentación con flotador para control de nivel y purga del destilador, cambio del sello barométrico y de la línea de llegada al tanque de almacenamiento, así como la instalación de temporizador para la operación automática de la misma. La figura 1.2 muestra el equipo remodelado en ese año, el cual se puso en operación con una producción de 14 litros por día. La producción durante los siguientes años osciló entre 21 y 30 litros por día, con algunos mantenimientos mayores como el cambio de flotador por uno de plástico y con varilla de acero inoxidable pero sin modificación significativa a su proceso.

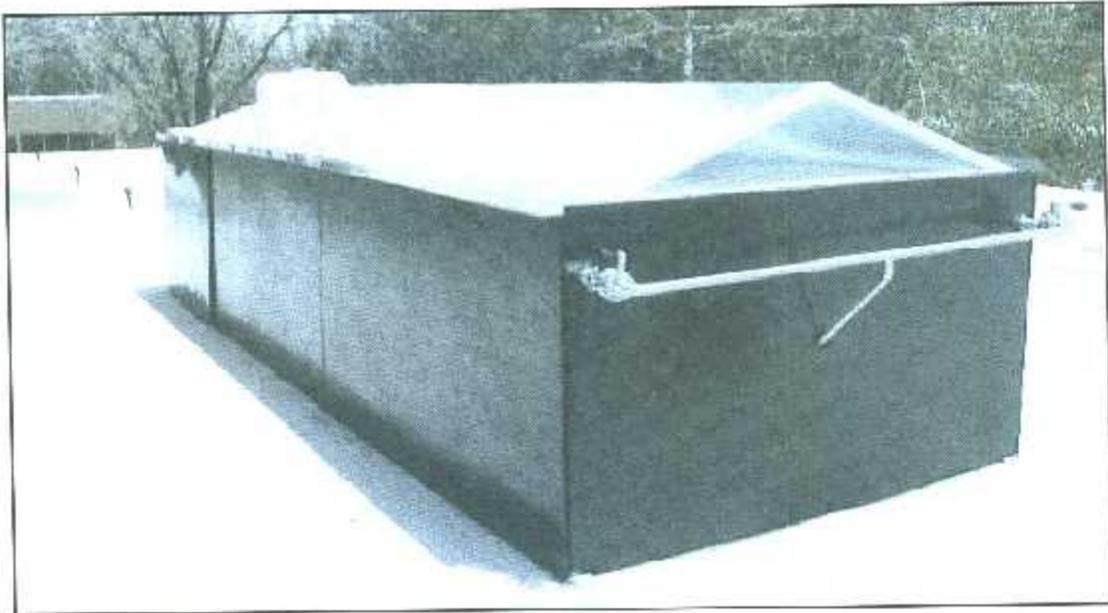


Figura 2.2. Destilador solar instalado en el Tecnológico de la Laguna, año 2008.

Analizando los datos obtenidos de la experiencia de uso del destilador solar existente en el Instituto Tecnológico de la Laguna y sus modificaciones, se pretende diseñar un equipo de destilación solar tipo dos vertientes basado en el modelo anterior con las mismas dimensiones, para aumentar la producción a 40 litros por día. El nuevo equipo tiene que prevenir todas las fallas que se han presentado en los 20 años de operación e incorporar mejoras, incluyendo una etapa de precalentamiento con colector solar, operación automática, monitoreo continuo y alarmas para la prevención y corrección de fallas.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general del proyecto

Diseñar e implementar el sistema de instrumentación y control para un destilador solar de alto rendimiento.

1.3.2. Objetivos específicos

1. Diseñar y fabricar un Destilador Solar de Alto Rendimiento con una capacidad de producción mayor a los 30 litros por día.
2. Diseñarlo como modulo, para que en caso de requerirse se puedan acoplar dos o más unidades.
3. Incluir en el diseño paredes desmontables para facilitar las actividades de reparación y mantenimiento.
4. Incluir precalentamiento de agua para aumentar la producción con las mismas dimensiones.
5. Diseñar e implementar un control para la operación automática por medio de un microcontrolador.
6. Instalar y habilitar purga automática del sistema.
7. Implementar un control automático para la purga del destilador solar, a partir de las mediciones de nivel de agua dentro de la charola, conductividad eléctrica y nivel de agua destilada, aplicando los algoritmos de Lógica Difusa.
8. Registro en computadora de las principales variables de operación del sistema.
9. Diseñar una interface de usuario para el registro, monitoreo y manipulación del proceso del destilador.
10. Elaboración de manual de operación del destilador solar
11. Participación en congresos
12. Publicar 1 artículo de divulgación.

1.4. Definición del proyecto

1.4.1. Naturaleza y descripción.

Los equipos que utilizan la energía solar para el proceso de destilación son llamados "solar stills" en inglés o "destiladores solares" en español. El equipo de destilación solar propuesto es un destilador solar tipo "dos vertientes", que puede funcionar durante muchos años y ofrecer una gran cantidad de agua destilada gratuita.

Un destilador solar de dos vertientes, como el que se observa en la figura 1.3 consiste en una charola, generalmente colocada de manera horizontal, para contener agua (provenientes de la toma general) y 2 cristales que la cubren a manera de "dos aguas" aislando el interior de manera hermética para favorecer la evaporación del agua. La cubierta transparente sirve a su vez como condensador, absorbe parte de la radiación solar y recibe toda la energía transferida por el vapor durante la condensación. El sol eleva la temperatura en el interior del destilador, donde se forma una atmosfera saturada evaporando el agua en la charola, que al hacer contacto con la cara interior de los cristales provoca la condensación. La inclinación de los vidrios provoca que las gotas "escurran" en canaletas para concentrar el agua ya destilada. Estas canaletas conducen el agua destilada a una tubería que la lleva a un tanque de almacenamiento diario. El rendimiento de este tipo de destiladores es relativamente bajo; se busca coleccionar eficientemente el agua destilada, minimizar las pérdidas de energía debidas a corrientes de aire y a la reflexión, y que permita una máxima transmisión de radiación.

Por lo general este es un destilador solar de gran tamaño con geometría triangular la misma que se utiliza en invernaderos donde se obtienen resultados de la radiación solar incidente sobre cada una de los condensadores con orientación fija y se obtiene una eficiencia de hasta 50%.



Figura 3.3. Destilador de dos vertientes la cubierta puede ser de dos aguas o de bóveda.

Se requiere asimismo drenar diariamente la charola para favorecer el proceso de evaporación. Este drenado debe calcularse en función de las variables del proceso: nivel, conductividad eléctrica (CE) del agua en la charola y del agua destilada.

El proyecto incluye implementar los algoritmos de control para calcular la eficiencia y el porcentaje de volumen de agua que debe purgarse de la charola del destilador solar a partir de mediciones de nivel y conductividad eléctrica en la charola y nivel en el tanque de agua destilada. Las mediciones de nivel de agua en charola y en el tanque de producción diaria se realizan con sensores ultrasónicos, la medición de conductividad eléctrica en el agua con un sensor que se pretende desarrollar y estudiar en el tecnológico, se utilizarán también 3 sensores de temperatura comerciales y 1 más de presión para asegurar que el sistema mantenga el hermetismo.

El diseño del destilador se pretende realizar en forma modular, que permita crecer la producción acoplando uno o más equipos en paralelo.

En el sistema de control y monitoreo se consideran etapas de alimentación, módulos de comunicación, un microcontrolador y el software para permitir la

portabilidad del sistema de monitoreo. Se utilizarán, en la medida posible, circuitos integrados para optimizar el espacio y los consumos de potencia.

Se transmiten los datos hacia una computadora para su procesamiento y visualización. El sistema se complementa con una interfaz gráfica en la PC para controlar y monitorear todas las variables del proceso desde alguno de los laboratorios, sin tener que trasladarse en campo. El diseño de la interfaz permite que el usuario controle y almacene información (historiales).

1.4.2. Análisis FODA

1.4.2.1. Fortalezas

- Contar con documentación proveniente de la experiencia de un destilador que ha operado por más de 20 años en el ITL.
- El procedimiento es simple en términos generales.
- Los costos de instalación son bajos.
- Se vale de la energía proveniente de la radiación solar para producir el agua destilada.
- Este proceso puede hacer uso del agua proveniente de un grifo (toma general) sin filtro.
- Permite remover con cierta sencillez las sales disueltas.
- El impacto ambiental de este proceso es prácticamente mínimo.
- Es aplicable en muchos giros empresariales.

1.4.2.2. Oportunidades

- Clima y geografía propicio para la captación de energía solar.
- Producción de agua destilada sin costo (una vez recuperada la inversión inicial) para el negocio, empresa o institución que adquiera el equipo.
- Interés de las empresas de la región, como lo es Met-Mex Peñoles, en el desarrollo de proyectos que propicien el uso de energías renovables.

1.4.2.3. Debilidades

- Leves tormentas de tierra frecuentes.
- Carencia de servicios públicos regulares para el suministro de agua.

1.4.2.4. Amenazas

- Los factores climáticos pueden influir en el desempeño del proceso.
- Granizo
- Fractura y rotura de vidrios

1.5. Metodología

El primer paso para el desarrollo de este proyecto fue la investigación documental, que consiste en recopilar y organizar la información relacionada con el proyecto, incluyendo la documentación existente de los destiladores que se han fabricado en el Tecnológico de la Laguna, así como la documentación sobre el colector solar desarrollado por la misma institución.

Una vez analizada la información se establecieron las necesidades del sistema, para continuar con el diseño estructural (estructura para fabricación) del destilador y del colector solar, así como la definición de especificaciones de los dispositivos de instrumentación y control.

Como segundo paso se procedió a buscar fuentes de financiamiento, se encontraron en el fondo de posgrado de DGEST, un apoyo del COECYT y parte se financio con recursos propios.

Se generaron las propuestas y se seleccionan los materiales para obtener las cotizaciones de los proveedores. En esta etapa se estudiaron todas las propuestas y se colocaron las órdenes de compra correspondientes a los materiales elegidos.

La fabricación del destilador se inició a la par que se cumplían los tiempos de entrega del material. Se empezaron a montar los elementos de instrumentación en la estructura y paralelo a este proceso se inicia con el desarrollo del control. Para el control se utiliza una tarjeta de desarrollo tipo Arduino Mega 2560.

Una vez terminadas estas etapas se hace la integración de todos los sistemas para dar inicio a la primera etapa de pruebas de campo, que arrojan resultados para su análisis. Se realizan modificaciones del equipo de así indicarlo el análisis obtenido.

Se llevan a cabo el resto de las etapas de pruebas y se reportan los resultados para incorporarlos al documento final del proyecto.

Se hace la presentación del proyecto en congresos y en el Evento Nacional de Innovación Tecnológica, después la revisión y corrección final del documento, para concluir con la puesta en marcha del equipo.

Capítulo 2. Marco Teórico

2.1. El Agua

El agua, sustancia esencial tanto para la vida como para la propia civilización humana, es el vehículo idóneo donde se desarrollan las complejas reacciones bioquímicas que hacen posible el desarrollo de la actividad vital de cualquier ser vivo. Además, se trata probablemente del único compuesto que se puede encontrar en nuestro planeta en los tres estados físicos de agregación de la materia, líquida, sólida y gaseosa, en una cantidad considerable [10].

Toda el agua que utiliza la humanidad procede de la precipitación del vapor acuoso de la atmósfera en forma de lluvia, granizo, nieve o escarcha, captada en una de las diversas etapas que recorre dicho líquido para volver a formar el vapor acuoso, por la vaporación del agua de ríos, suelo, estanques lagos, mar y vegetación. El agua además de ser parte esencial para los seres vivos desempeña un papel preponderante en unión del calor, en la determinación de los climas, de los cuales es componente esencial, de la fisionomía de las plantas y de las actividades de los animales [11].

Puesto que el agua nunca se halla pura, ya que constituye el medio de disolución más frecuente de sustancias sólidas y gaseosas, no puede ser usada directamente de la naturaleza sino que tiene que pasar por un proceso de tratamiento para eliminar todas las partículas nocivas para la salud y bienestar humano [12].

Las aguas de lluvias contienen, desde su caída cierta cantidad de sustancias gaseosas en 1L de agua de lluvia puede contener a 10°C 0.0175mg de Nitrógeno, 0.0011mg de oxígeno, 0.00073mg mg de Argón, 0.00068mg de dióxido de carbono

además contiene hidrógeno, helio, amoníaco y ácido nítrico, y en ciertas zonas ácido sulfúrico, cloruros y sulfatos en cercanías del mar [11].

2.1.1. Conductividad del Agua

La conductividad eléctrica (CE) es la capacidad de conducir electricidad. Coexisten muchas unidades de expresión de la conductividad, las más utilizadas son dS/m (deciSiemens por metro), mmhos/cm (milimhos por centímetro) en unidades estándar y según los organismos de normalización europeos mS/m (miliSiemens por metro) en el Sistema Internacional.

La corriente eléctrica resulta del movimiento de partículas cargadas eléctricamente y como respuesta a las fuerzas que actúan en estas partículas debido a un campo eléctrico aplicado. En el agua y otros fluidos se puede generar el movimiento de una red de iones cargados. Este proceso produce corriente eléctrica y se denomina conducción iónica.

El agua destilada ordinaria en equilibrio con dióxido de carbono en el aire tiene una conductividad aproximadamente de 20 dS/m. Debido a que la corriente eléctrica se transporta por medio de iones en solución, la conductividad aumenta cuando aumenta la concentración de iones.

A continuación se presentan los niveles de conductividad eléctrica en distintos tipos de aguas:

- Agua Ultra Pura 5.5×10^{-6} S/m ó 0.005 mS/m.
- Agua potable 0.005 – 0.05 S/m ó 5 mS/m.
- Agua del mar 5 S/m ó 5000 mS/m.

CE es realmente una medida de la actividad iónica de una solución en términos de su capacidad para transmitir corriente. En soluciones en dilución, los

sólidos disueltos totales (TDS) y la CE son comparables en una muestra de agua basado en medida de EC calculado mediante la siguiente ecuación:

$$\text{TDS (mg/l)} = 0.5 * 1000 \times \text{EC (mS/cm)} \quad \text{Ecuación (2.1)}$$

La relación expresada en la ecuación 2.1 también se puede usar para determinar la aceptabilidad de un análisis químico del agua. No se aplica en agua residuales crudas sin ningún tratamiento o en aguas residuales industriales con amplia contaminación.

2.1.2. Energía Solar

La energía solar es una de las llamadas energías renovables, particularmente del grupo no contaminante, conocido como energía limpia o energía verde.

Poco a poco además de el avance tecnológico, también hubo un avance de las ciencias y el descubrimiento de nuevos aspectos a considerar, como el ecológico, con lo que se comprende el efecto de nuestras acciones sobre nuestro entorno, y que logra que las empresas no solo se enfoquen en producir, sino también en reducir el efecto al entorno y también logra el desarrollo de la legislación ambiental en cada país. Con una mejor comprensión de la luz y con algunos avances tecnológicos que fueron agentes generadores de una nueva visión, la de utilizar la luz solar para generar energía. Sin embargo, no siempre se dispone de la misma cantidad de luz solar. Saber cuánta energía se podría producir es probablemente el cuestionamiento que por el cual se empezó a estudiar más la energía solar y se vio la necesidad de hacer un equipo que ayudara a medir la cantidad de radiación que se tiene día a día para determinar cuál podría ser el aprovechamiento de la luz solar.

La intensidad de esta energía disponible en un punto determinado del planeta tierra dependerá del día del año, la hora y la latitud, aunque también incidirá en la

cantidad de energía que pueda acumularse y la orientación que disponga el dispositivo receptor.

2.1.3. Radiación Solar

Se conoce como radiación al proceso físico por medio del cual se transmite energía en forma de ondas electromagnéticas que viajan a la velocidad de la luz (300000 km/s. No requiere de algún medio para su propagación[13].

Para un mejor tratamiento de la radiación solar en cuanto a sus aplicaciones, el flujo radiante solar se suele descomponer en dos términos:

- Irradiancia directa es la componente del flujo radiactivo solar que incide sobre una superficie unidad y que no ha sido dispersada por la atmósfera. Esta componente tiene en cada instante una dirección perfectamente definida que coincide con la dirección de propagación del flujo solar:
- Irradiancia difusa Es la componente del flujo radiactivo solar que incide sobre una superficie unidad, cuya dirección de propagación ha sido modificada por dispersión en la atmósfera. A diferencia con la irradiancia directa, esta radiación llega a la superficie desde cualquier región del hemisferio.

El dispositivo más común para medir la radiación solar es el pyranómetro, algunas veces llamado radiómetro o solarímetro, el cual mide la radiación solar global, compuesta de radiación solar directa y de la radiación difusa. Un porcentaje significativo de radiación medida es directa, la cual toma un valor máximo cuando ésta incide perpendicularmente sobre el sensor del pyranómetro. En un día claro la radiación global medida se incrementa desde prácticamente cero cuando el sol sale, alcanza un máximo al medio día y decrece a prácticamente cero nuevamente cuando

el sol se oculta; en cualquier momento, las nubes pueden interceptar el sol y la energía decrece a valores bajos.

Debido al movimiento diario y anual de la tierra, la cantidad de radiación solar medida por un pyranómetro en posición horizontal no es uniforme durante todo el año; por lo que se hace necesario medir la radiación solar en superficies inclinadas.

Para un observador situado en la Tierra, el Sol sigue una trayectoria circular a través del firmamento en un día, alcanzando su punto más alto al mediodía. Por otra parte, esta trayectoria circular aparente se mueve hacia puntos más altos en el firmamento a medida que el invierno transcurre y llega el verano. Durante el verano, amanece más temprano y atardece más tarde. Dado que los movimientos de la Tierra y el Sol son relativos entre sí, suponiendo que la tierra esta fija en el espacio, que el sol describe un movimiento virtual alrededor de esta, y que el origen de coordenadas se localiza en el lugar de interés situado en la tierra. Desde este punto de vista, el Sol está restringido a moverse con dos grados de libertad en la esfera celeste. En consecuencia, su posición en el firmamento queda descrita mediante dos variables angulares: la altura solar y el acimut solar.

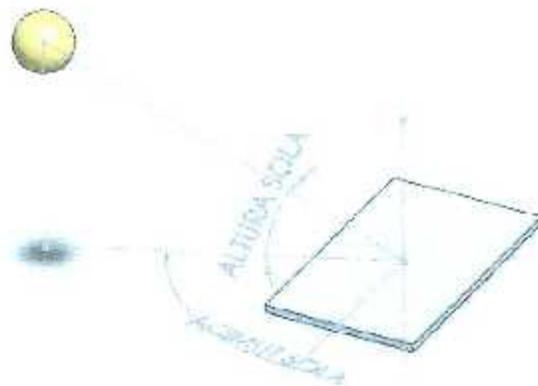


Figura 2.1. Ángulos que definen la posición del sol.

Como se muestra en la Figura 2.1 la primera de estas variables define el ángulo que la visual al Sol forma con el horizonte, en tanto que la segunda define la desviación que tienen los rayos del Sol con respecto al sur verdadero [14].

El cálculo preciso de estas variables depende fundamentalmente de tres parámetros: la latitud del lugar, la declinación y el ángulo horario. La latitud queda definida mediante el ángulo que determina el lugar de interés sobre la Tierra, con respecto al plano del ecuador, este ángulo es positivo cuando se mide hacia el norte del ecuador, y negativo cuando lo es hacia el sur de este. La declinación define la posición angular del Sol al medio día solar, es decir, en el momento en que el Sol está más alto en el firmamento con respecto al plano del Ecuador.

2.1.4. Variabilidad de la radiación solar en Torreón, Coahuila.

La ciudad de Torreón, donde se pretende implementar este sistema, tiene una población de 629.639 habitantes. Y se localiza en la parte oestedel sur del estado de Coahuila, México, como se puede observar en el mapa de la República Mexicana que se muestra en la figura 2.2, en las coordenadas 103° 26'33" longitud oeste y 25°32' 40" latitud norte, a una altura de 1.120 metros sobre el nivel del mar. Limita al norte con los municipios de Francisco I. Madero y San Pedro, al este con el municipio de Matamoros, al sur y al oeste con el estado de Durango principalmente con los municipios de GómezPalacio y Lerdo.

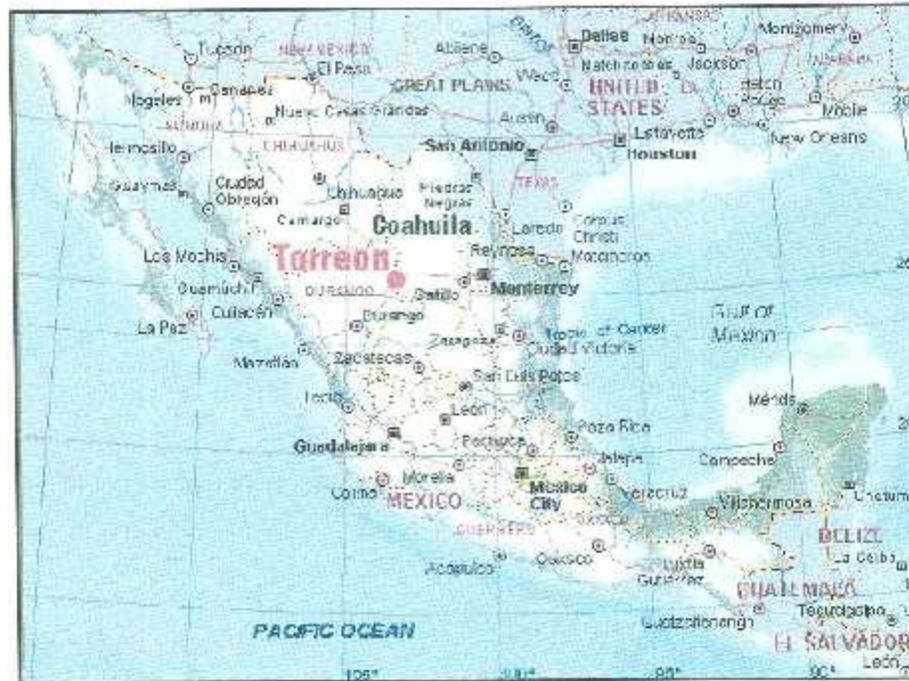


Figura 2.2. Ubicación de la ciudad de Torreón, Coahuila en el mapa de la República Mexicana con división política. Disponible en <http://turismo.torreon.gob.mx/torreon.cfm>

El clima en Torreón es cálido-seco, con una temperatura promedio anual de 24°C (aunque en verano puede superar los 40°C). Muy a menudo soplan corrientes de aire caliente. El régimen de lluvias se registran en los meses de abril, mayo, junio, julio, agosto, septiembre y octubre; siendo escasas en noviembre, diciembre, enero, febrero y marzo. Los vientos predominantes tienen dirección sur con velocidades de 27 a 44 Km/h. La frecuencia de heladas es de 0 a 20 días, en la plenitud del invierno la temperatura baja hasta de -3°C.

La ciudad de Torreón se encuentra en un punto estratégico entre el norte y el centro del país, como se muestra en la figura 2.2. se puede arribar por vía aérea, terrestre y ferroviaria [15].

Según estudios, la región es una de las seis zonas del mundo con mayor radiación solar, manteniendo un nivel de 5.5 horas al día. Y es que en la región se

presentan más de 300 días de sol al año, con una intensidad que pone a Coahuila entre los estados con mayor índice de radiación a lo largo de los doce meses, incluso durante la época de invierno.

La ciudad de Torreón se encuentra localizada, como se muestra en la figura 2.3, en la zona con radiación global media diaria de 5,0 a 5,1 kWh/m².

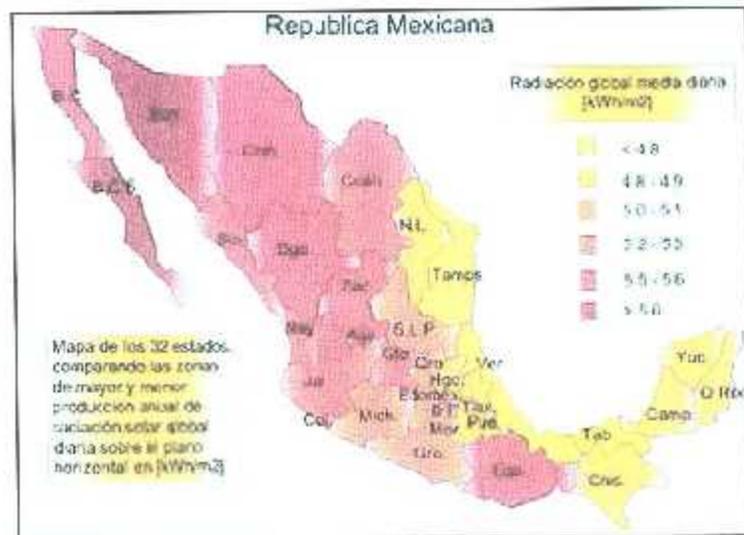


Figura 2.3. Radiación global media diaria en la República Mexicana. Fuente: Servicio Meteorológico Nacional. Ing. Manuel Muñoz Herrera.

La radiación, como se muestra en la tabla 2.1, ha sido variable mostrando altas y bajas, pero según las estadísticas del 2008 al 2011 ha ido en aumento, por lo que se espera que continúe esa tendencia, lo que hará más eficiente el sistema que se pretende implementar.

Año	Radiación(kWh/m ²)		
	Mínima	Media	Máxima
1997	3,8	5,4	7,1
1998	4,1	5,7	7,3
1999	3,2	5,4	7,5
2000	3,0	4,6	5,6
2001	2,5	4,3	5,4
2002	2,8	4,2	5,3
2003	2,7	4,3	5,6
2004	2,6	4,2	5,4
2005	3,0	4,9	7,1
2006	3,3	5,0	6,4
2007	3,4	5,3	6,4
2008	2,9	4,6	5,9
2009	3,0	5,1	6,8
2010	3,2	5,7	7,4
2011	3,5	5,8	7,6
Promedio	3,1	5,0	6,2

Tabla 2.1. Estadística de radiación en Torreón 1997 – 2011. Fuente: Servicio Meteorológico Nacional. Observatorio Torreón, Coahuila. 2012.

La condición de nubosidades casi nula en la región, ya que la mayor parte de los días el cielo está despejado y se cuenta con un promedio de 12 horas de sol al día por año, la distribución por mes se muestra en la tabla 2.2:

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Hrs/día	10:44	11:18	12:02	12:46	13:24	13:42	13:32	12:59	12:16	11:32	10:53	10:34

Tabla 2.2. Promedio de horas de luz solar al día en Torreón año 2012. Fuente: Servicio Meteorológico Nacional.

Según Farrington Daniels (1977), las mejores zonas de aprovechamiento solar se encuentran entre los paralelos 15° y 35° de latitud Sur y Norte, ya que reciben una radiación mínima de 500 cal/cm² y una variación mensual total menor a 250 al día. Estas zonas son regiones ecuatoriales de los desiertos áridos de la Tierra, en las

cuales, el Sol incide en esta superficie con un 90% de radiación directa, lo que las hace muy apropiadas para la instalación de plantas solares[16].

La altitud según García (2001) representa una gran limitante para la generación de electricidad, ya que a mayor altitud la potencia de la turbina se reduce, por lo tanto, una altitud adecuada es menor a 2.800 metros [17].

La ciudad de Torreón se encuentra en las coordenadas 103° 26'33" longitud oeste y 25° 32'40" latitud norte, a una altura de 1.120 metros sobre el nivel del mar. Lo cual se encuentra dentro de los parámetros antes mencionados.

2.1.5. Tipos y usos de la energía solar

Directa: Una de las aplicaciones de la energía solar es directamente como luz solar, por ejemplo, para la iluminación de recintos. En este sentido, cualquier ventana es un colector solar. Otra aplicación directa, muy común, es el secado de ropa y algunos productos en procesos de producción con tecnología simple.

Térmica: Se denomina "térmica" la energía solar cuyo aprovechamiento se logra por medio del calentamiento de algún medio. La climatización de viviendas, calefacción, refrigeración, secado, etc., son aplicaciones térmicas.

Fotovoltaica: Es la energía solar aprovechada por medio de celdas fotoeléctricas, capaces de convertir la luz en un potencial eléctrico, sin pasar por un efecto térmico.

Sistemas pasivos: Los sistemas pasivos se usan generalmente en el acondicionamiento calorífico de edificios y tanto lo que sirve de colector como el sistema de almacenamiento se encuentran incorporados en los distintos componentes del edificio, como pisos, paredes, recipientes con agua y techos. El tipo

de almacenamiento de energía utilizado en estos sistemas es generalmente por calor sensible. Debido a que en estos sistemas las temperaturas de almacenamiento son bajas, usualmente menores de 70°C, se requiere de grandes volúmenes del material que sirve como almacén.

Sistemas activos: La característica principal de los sistemas activos es que estos utilizan un fluido de trabajo en movimiento que puede ser agua, aire, aceites o algún otro fluido. Los principales componentes que intervienen en estos sistemas son: el colector solar, la unidad de almacenamiento, sistemas de conversión y control y el lugar donde se hace la descarga de energía. Generalmente, el medio de almacenamiento es agua si por el colector se hace circular un líquido. Si en el colector circula aire, el medio de almacenamiento serán rocas o piedras. Las temperaturas alcanzadas en este tipo de sistemas oscilan entre los 50°C y 100°C. En este caso el almacenamiento de energía se puede dar por cualquiera de los mecanismos como: calor sensible, cambio de fase, reacciones químicas y estanques solares. Este sistema trabaja en dos etapas al igual que en el caso anterior: durante el día almacena calor y lo cede por la tarde o noche.

2.1.6. Sistemas de Aprovechamiento de la Energía Solar

En la actualidad, la energía solar está siendo aprovechada para fines energéticos a través de dos vías basadas en principios físicos diferentes. Por un lado la vía térmica. Los sistemas que adoptan esta vía absorben la energía solar y la transforman en calor. Por otro lado, la vía fotovoltaica este permite la transformación directa de la energía solar en energía eléctrica mediante las llamadas "celdas solares" o "celdas fotovoltaicas". Dichas celdas hacen posible la producción de electricidad a partir de la radiación solar debido al efecto fotovoltaico, un efecto por el que se transforma directamente la energía luminosa en energía eléctrica y que se produce cuando la radiación solar entra en contacto con un material semiconductor cristalino.

Los sistemas basados en la vía térmica también pueden hacer posible el aprovechamiento de la energía solar en forma de energía eléctrica, siguiendo un método "indirecto". En efecto, algunos de estos sistemas absorben la energía solar en forma de calor mediante un captador térmico y después la transforman en electricidad mediante una máquina termodinámica.

2.2. Destilación Solar

La destilación solar contribuye al aumento de la sostenibilidad de los sistemas de aprovechamiento de las fuentes renovables de energía. La fuente energética primaria (la radiación solar) se conjuga con la esencia misma de los sistemas de energías renovables; la calidad del agua obtenida es óptima para lo que se utiliza; la sencillez de los equipos no requiere de personal altamente calificado para su manejo, mantenimiento y reparación; sus costos resultan accesibles, y los volúmenes de agua que se obtienen con estos equipos cubren el ciento por ciento de las demandas durante los 365 días del año.

La destilación solar se presenta como una alternativa atractiva para producir agua potable y el uso de los destiladores solares ha recibido considerable atención a partir de 1960 en muchos países y además es de esperar que este interés aumente rápidamente en los próximos años [18].

El principio de destilación sigue el mismo principio que el ciclo del agua, empezando por un calentamiento en el agua del estanque, debido a la radiación solar que llega a los cristales y es transmitido al agua, provocando que haya una evaporación en la cual se eliminan las sales iónicas que contienen, para después, los vapores ligeros, sufran una condensación en los cristales y se deslicen en forma

de gota por los mismos, hacia los canales de destilado, para hacerla llegar al interior del laboratorio por medio de una tubería.

2.3. Tipos de Destiladores

Los destiladores solares de agua de mar se usan desde la época de los griegos, y han sido muchos investigadores los que han desarrollado diferentes modelos.

En México a lo largo de todo el país existen comunidades que carecen de agua potable, costas, hay un elevado número de comunidades que carecen de agua potable. También varias familias dentro de la ciudad no tienen agua de buena calidad. En estos casos es necesario recurrir a la purificación del agua, que es un tratamiento de purificación sumamente caro. Es en este sentido que la destilación solar se presenta como una alternativa atractiva: ya que, la demanda energética es en forma de calor de baja temperatura (40 - 60 °C). Utilizando la radiación solar y una tecnología, relativamente sencilla, es posible obtener la evaporación del agua de mar o agua del pozo. En la condensación se produce agua potable dejando el producto sólido [19].

El objetivo de la destilación al vacío es disminuir y eventualmente eliminar la transferencia de calor por convección, de manera que al disponer una serie de bandejas formando un destilador de varias etapas, cada etapa no vea disminuida su eficiencia a causa de una creciente influencia en la transferencia de calor convectiva del aire.

2.3.1. Destilador solar de una vertiente o tipo Batea

Es quizá el modelo de destilador más sencillo de estructura. Se trata de una caja cubierta por un cristal inclinado como en la figura 2.4. La caja está dividida en dos compartimentos: uno con el fondo de color negro donde se coloca el agua a evaporar y que ocupa la mayor parte de la caja y el otro el receptáculo donde se recoge el agua destilada y que se encuentra en el lado de menor altura.

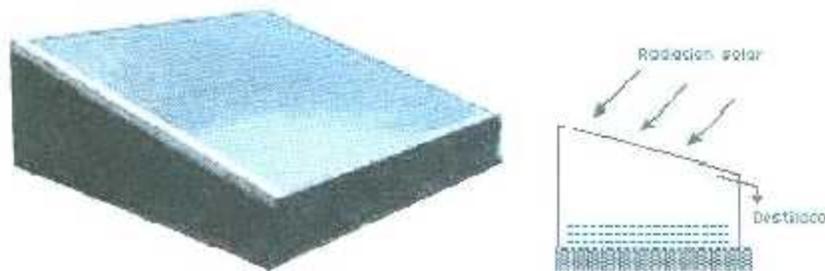


Figura 2.4. Destilador solar de una vertiente o tipo Batea. Efecto Simple

Conforme aumenta la temperatura, el agua comienza a evaporarse. Con el fin de minimizar la pérdida de calor del vapor de agua, la cubeta de agua está rodeada con aislante de calor al fondo y en los lados. Además la cubeta está dentro de una caja que va tapada con una cubierta de vidrio transparente. Una parte de esta radiación es absorbida por el agua que se encuentra en el estanque, y la otra parte es emitida con una longitud de onda mayor que la radiación incidente. A causa de su mayor longitud de onda, esta radiación no puede atravesar hacia el exterior la cubierta transparente, quedando confinada dentro del destilador solar. Ambas radiaciones provocan un incremento de la temperatura ambiente en el interior que favorece la evaporación de una pequeña parte del agua disponible en el estanque [19]. El vapor así obtenido se condensa al entrar en contacto con la cara interior de la cubierta y forma pequeñas gotas de agua destilada o desalada que terminan uniéndose

entre sí y deslizando por la pendiente de la cubierta. Finalmente son recogidas y canalizadas hasta un colector y terminan en el depósito de agua destilada. Presentan rendimientos típicos del 30%, entendiendo como tal la cantidad de agua destilada producida, frente a la cantidad máxima que podría producirse considerando la radiación solar incidente de la que se dispone y el calor de vaporización del agua. La producción específica diaria de un destilador solar simple tipo batea se encuentra entre 1 y 4 litros por cada m^2 de superficie [20].

Una forma de aumentar el rendimiento de los destiladores solares tipo batea, es asisténdolos térmicamente, por ejemplo puede ser llevado a cabo por la incorporación de un colector plano [21].

2.3.2. Destilador tipo Batea multiefecto

Con la configuración mostrada en la figura 2.5, la mayor pérdida de energía se produce en forma de calor latente de condensación del agua en la cubierta, con lo que la energía que es necesaria para producir el destilado es aproximadamente igual a su calor de vaporización.

El rendimiento térmico de los destiladores solares puede incrementarse significativamente reutilizando dicho calor en dos o más etapas. Así, en un destilador solar tipo batea se puede incorporar una superficie (o incluso más) entre el estanque y la cubierta. Sobre esta superficie, que sirve de fondo de un recipiente que también contiene agua salada, se condensa el vapor de agua que proviene del estanque. En dicha condensación el vapor cede su calor latente y calienta el agua salada contenida en este recipiente intermedio. Este tipo de destiladores se llama multi-efecto.

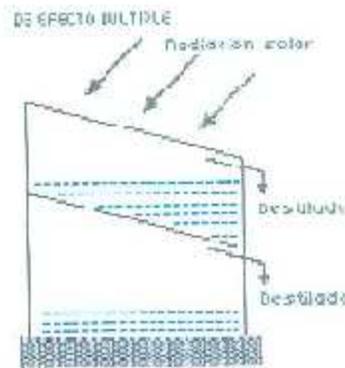


Figura 2.5. Destilador Solar tipo Batea Multifecto.

2.3.3. Destilador solar de dos vertientes

El siguiente en complejidad estructural. Es el más conocido y difundido en el mundo y consiste en una caseta de material semitransparente, generalmente vidrio de 5 mm de espesor, que se coloca sobre una bandeja que contiene la mezcla de la cual se quiere obtener un destilado. Dicha bandeja es de muy poca profundidad, contiene una delgada lámina de la mezcla, y está herméticamente cerrada con vidrio transparente, como se puede observar en la figura 2.6. Los ángulos que forman las láminas de vidrio con la horizontal pueden variar, obteniéndose diferentes rendimientos para los diversos casos.

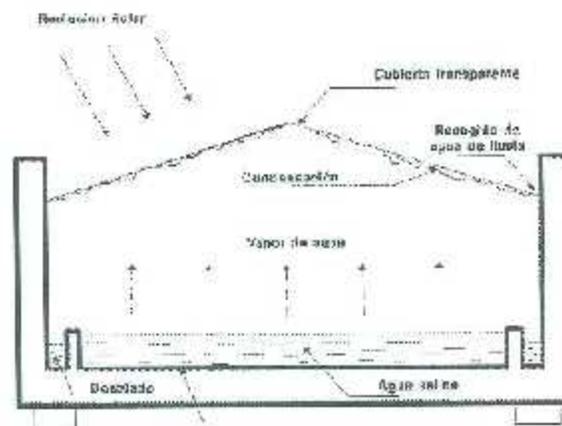


Figura 2.6. Destilador de dos vertientes la cubierta puede tener forma de dos aguas o de bóveda.

2.3.4. Destilador Solar tipo Cascada

Si en vez de una charola, en la construcción del evaporador se utilizan varias charolas alargadas, dispuestas en forma de escalera como en la figura 2.7, es posible mantener todos los puntos del evaporador a menor distancia del condensador inclinado. Por otro lado, es posible orientarlo adecuadamente hacia la posición promedio del Sol. Una bandeja múltiple, consiste en una serie de bandejas negras horizontales bajas incluidas en un envase aislado con una cubierta transparente. Este modelo se puede utilizar en latitudes más alejadas porque la unidad entera puede ser inclinada para permitir que los rayos del sol caigan perpendiculares a la superficie transparente. La característica de la inclinación, sin embargo, es menos importante en y cerca del ecuador donde hay menos cambio en dicha orientación.

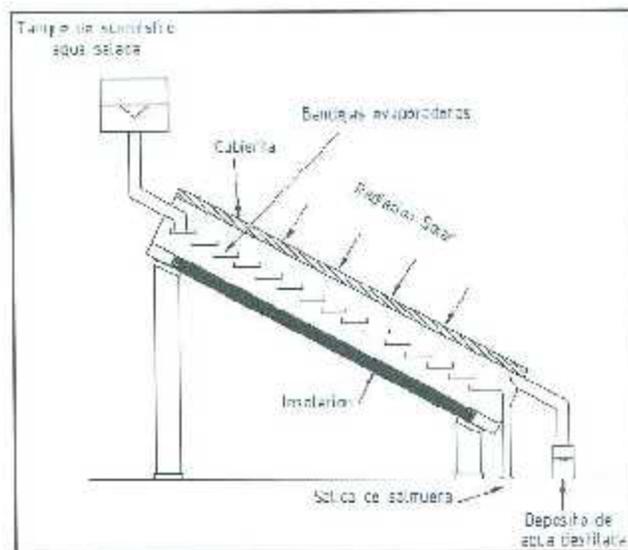


Figura 2. 7. Destilador solar tipo cascada

2.3.5. Destilador Solar tipo esférico de barredera

La particularidad de este modelo, mostrado en la figura 2.8, se basa en la forma esférica del material transparente así como en la introducción de una

barredera que lame su cara interna y que está accionada por un pequeño motor. En una bandeja con fondo de color oscuro situada en la parte central de la esfera se coloca el agua a destilar. Este modelo tiene forma esférica buscándose favorecer la captación solar al evitarse las sombras que alguna parte del destilador pueda provocar en otra. Además la forma esférica logra mantener una mayor inercia térmica facilitando un mayor aprovechamiento del calor producido por la energía solar.

Por su parte la barredera arrastra las pequeñas gotas que se van formando en el interior de la esfera juntándolas y provocando que se precipiten por gravedad a la parte baja donde se acumulan. Con el sistema de barredera se evita que las gotas reflejen la radiación solar y se permite que el agua en estado gaseoso se condense con mayor facilidad en las paredes. Estos factores aumentan el rendimiento del equipo si bien como contrapartida se tiene que es necesario suministrarle energía eléctrica para hacer posible el movimiento de la barredera.

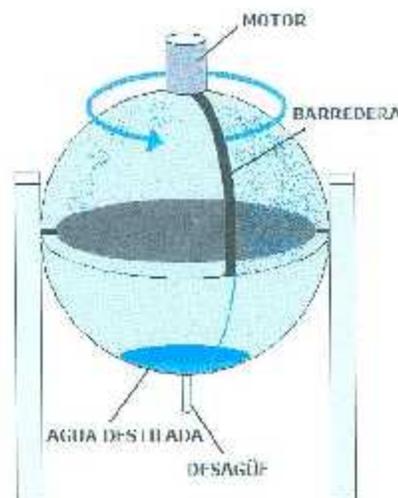


Figura 2.8. Destilador solar tipo Barredora.

2.3.6. Destilador Solar Multietapa

En ellos se evapora agua, pero el agua salada y las superficies de condensación se disponen de manera tal que el calor de condensación que se disipa es reutilizado, a menor temperatura, para volver a evaporar agua que será condensada en otra superficie. Esta disposición se puede repetir, usándose varias etapas de evaporación-condensación. Dado que el mismo calor se reutiliza varias veces, cada vez a una temperatura algo menor, la producción de agua destilada por unidad de energía utilizada queda multiplicada por un factor importante. Estos equipos también eliminan la contaminación biológica. También puede ser utilizado para el suministro de agua destilada en pequeñas cantidades para usos específicos en zonas urbanas. En esos casos el dispositivo puede funcionar con gas y producirá un ahorro considerable de combustible frente a los diseños en uso común [22].

2.4. Colectores Solares

Un colector solar es un dispositivo diseñado para recoger la energía proveniente de la radiación solar y convertirla en energía térmica. Los colectores se dividen en dos grandes grupos: los captadores de baja temperatura, utilizados fundamentalmente en sistemas domésticos de calefacción, y los colectores de alta temperatura, conformados mediante espejos y utilizados generalmente para producir vapor.

El colector solar plano trabaja haciendo pasar un líquido a través de él, usando la energía solar para elevar la temperatura del líquido que fluye.

Las partes del colector solar son las siguientes: el absorbente, para convertir la radiación solar en calor, la cubierta de vidrios para detener la pérdida de éste hacia afuera, el aislamiento de los lados y de la parte inferior para impedir también la pérdida de calor. Todo esto se mantiene junto por el marco del colector[23].

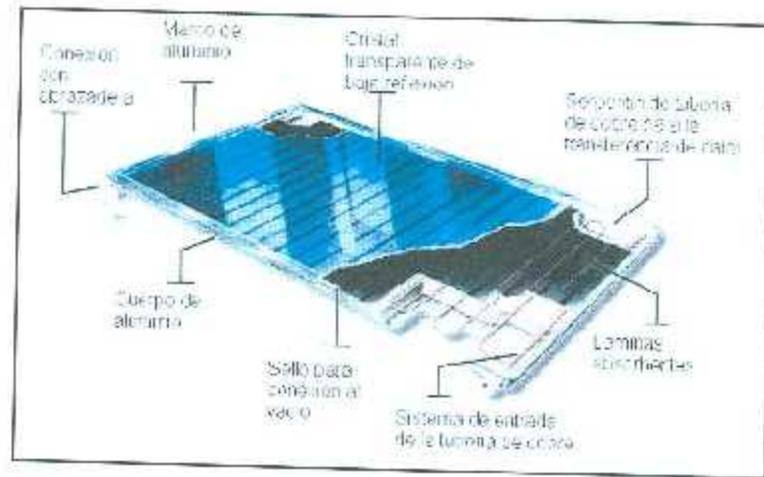


Figura 2.9. Esquema de un colector solar plano.

Los colectores solares planos cuya función es calentar agua pueden estar fabricados en distintos materiales (acero, cobre, aluminio, plásticos, etc.) pero están basados siempre en el mismo principio, denominado "efecto invernadero", que consiste en captar en su interior la energía solar, y no dejar que se pierda lográndose así aumentar la temperatura del agua en su interior.

2.5. Sensores

Un sensor es un dispositivo capaz de detectar estímulos o acciones externas y responder en consecuencia, generando una salida funcionalmente relacionada en forma de una señal eléctrica. Durante las últimas dos décadas, ha habido un crecimiento sin precedentes en el número de productos y servicios, los cuales utilizan información obtenida por el monitoreo y medición usando diferentes tipos de sensores. Al desarrollo de sensores que cumplen con ciertos requerimientos se le conoce como tecnología de sensores que cubre una amplia gama de aplicaciones, como medio ambiente, medicina, comercio e industria.

2.5.1. Tipos de sensores

En función de la variable a medir, se utilizan distintos tipos de sensores con características diferentes en velocidad de respuesta, linealidad, precisión, desviación con el tiempo, entre otras.

A continuación se indican algunos tipos y ejemplos de sensores electrónicos:

- Sensores de temperatura: Termopar, Termistor
- Sensores de deformación: Galga extensiométrica
- Sensores de acidez: IsFET
- Sensores de luz: fotodiodo, fotorresistencia, fototransistor
- Sensores de sonido: micrófono
- Sensores de contacto: final de carrera
- Sensores de imagen digital (fotografía): CCD o CMOS
- Sensores de proximidad.
- Sensores de conductividad eléctrica.

Por lo general la señal de salida de estos sensores no es apta para su procesamiento, por lo que se usa un circuito de acondicionamiento, como por ejemplo un puente de Wheatstone, y amplificadores que adaptan la señal a los niveles apropiados para el resto de la circuitería.

2.5.1.1. Sensores Ultrasónicos (Nivel)

Los sensores ultrasónicos son empleados en las industrias químicas como sensores de nivel por su mayor exactitud en presencia de burbujas en los reactores. Funcionan al igual que el sistema de sonar usado por los submarinos. Emiten un pulso ultrasónico contra el objeto a sensar, al detectar el pulso reflejado, se para un contador de tiempo que inició su conteo al emitir el pulso. Este tiempo es referido a

distancia y de acuerdo con los parámetros elegidos de respuesta ("Set Point") con ello manda una señal eléctrica digital o analógica [24].

La técnica actual permite la fabricación de estos sensores con un rango de detección desde 100 mm hasta unos 6000 mm con una exactitud de 0.05%. Estos sensores son empleados con gran éxito sobre otros tipos de sensores para detectar objetos a cierta distancia que son transparentes o extremadamente brillosos y no metálicos.

2.5.1.2. Sensores de Presión

Los sensores de presión sofisticados funcionan a base de celdas de carga y de sus respectivos amplificadores electrónicos, y se basan en el conocido puente de Wheatstone, donde una de sus piernas está ocupada por el sensor. Este sensor es básicamente una resistencia variable en un sustrato que puede ser deformado, y lo cual ocasiona el cambio en el valor de la mencionada resistencia.

Los sensores comunes de presión son interruptores eléctricos movidos por una membrana o, un tubo Bourdón. El tubo Bourdón se abre hacia afuera con el aumento de presión y este movimiento es transmitido a un interruptor, el cual es accionado cuando la posición del tubo corresponde con un ajuste preseleccionado. En el caso de los interruptores de presión por diafragma, la fuerza provocada por la presión sensada actúa sobre un resorte, el cual al ser vencido actúa sobre un microinterruptor. Es obvio que el resorte determina el rango de presión de operación.

En la industria hay un amplísimo rango de sensores de presión, la mayoría orientados a medir la presión de un fluido sobre una membrana. Proporcionan una variación de tensión exacta y directamente proporcional a la presión que se les aplica. El sensor consta de un diafragma monolítico de silicio para medir el esfuerzo y una fina película con una red de resistencias integradas en un chip. El chip se

ajusta, calibra y compensa en temperatura por láser. En los sensores electrónicos en general, la presión actúa sobre una membrana elástica, midiéndose la flexión. Para detectarla pueden aprovecharse diversos principios físicos, tales como inductivos, capacitivos, piezorresistivos, ópticos, monolíticos (con módulos electrónicos extremadamente pequeños, totalmente unidos) u óhmicos (mediante cintas extensométricas) [25].

2.5.1.3. Sensores de Temperatura

Los sensores de temperatura más sencillos son los que actúan sobre un interruptor miniatura y en general, éstos son de dos tipos: Sistemas de Dilatación de un fluido y bimetálicos. Los primeros actúan al dilatarse el líquido o el gas contenido dentro de un capilar y, los segundos actúan directamente el interruptor mediante el efecto de diferencia de dilataciones de tiras de dos metales diferentes. En general, se usan para interrumpir hasta corrientes de 30 Amperes en 120 volts.

Otros sensores de temperatura son los termopares, detectores de temperatura por resistencia (RTD) y, los termistores[26].

a) Termopares

Los termopares están hechos de dos alambres de metales diferentes unidos precisamente en el punto de medición, también conocido como "unión caliente". Un pequeño voltaje llamado Seebeck, en honor a su descubridor, aparece entre los dos alambres en función de la temperatura de esa unión y, ese voltaje es la señal que actúa sobre el controlador de temperatura.

Los termopares son en general de los sensores los más baratos y los más robustos, aunque para evitar errores de materiales disímiles, los cables de extensión deben ser del mismo material del termopar. Existen termopares apropiados para diferentes rangos de temperatura y diferentes ambientes industriales.

b) RTD

Los RTD están principalmente hechos de alambre de platino enrollado en una base cerámica cubiertos de vidrio o de material cerámico. Además pueden encontrarse como película en un sustrato.

Con la temperatura, el platino cambia de resistencia y con un circuito similar al conocido Puente de Wheatston este cambio puede ser utilizado en un indicador o controlador de temperatura. Este tipo de sensor se fabrica también de Níquel en lugar de Platino pero son más usuales los de este último material [27].

c) Termistores.

Los termistores están fabricados de un material semiconductor que cambia su resistencia eléctrica abruptamente en un pequeño rango de temperatura, por lo que son empleados en sistemas de adquisición de datos y en equipos delicados. Su principio se basa en el efecto de la temperatura sobre una unión de un diodo, la cual varía con la temperatura.

Su desventaja es que requieren de potencia para funcionar por lo que se autocalientan, y eso debe ser compensado en el circuito de medición.

Existen dos diferentes tipos de termistores:

- **NTC** (por sus siglas en inglés, Coeficiente de Temperatura Negativo).
- **PTC**(por sus siglas en inglés, Coeficiente de Temperatura Positivo).

2.5.1.4. Sensor de conductividad

La conductividad eléctrica, se define como la capacidad que tienen las sales inorgánicas en solución (electrolitos) para conducir la corriente eléctrica.

El agua pura, prácticamente no conduce la corriente, sin embargo el agua con sales disueltas conduce la corriente eléctrica. Los iones cargados positiva y negativamente son los que conducen la corriente, y la cantidad conducida dependerá del número de iones presentes y de su movilidad.

En la mayoría de las soluciones acuosas, cuanto mayor sea la cantidad de sales disueltas, mayor será la conductividad, este efecto continúa hasta que la solución está tan llena de iones que se restringe la libertad de movimiento y la conductividad puede disminuir en lugar de aumentar, dándose casos de dos diferentes concentraciones con la misma conductividad.

El sensor de conductividad se puede utilizar para medir la conductividad en una solución o la concentración total de iones en muestras acuosas que se investigan en el campo o en el laboratorio. Puede ser conectada a cualquier interface. La conductividad es una de las pruebas ambientales más fáciles en muestras acuáticas. Aunque no dice que iones específicos están presentes, determina rápidamente la concentración total de iones en una muestra. Se puede utilizar para realizar una amplia variedad de pruebas o planear experimentos para determinar cambios en los niveles de iones o salinidad total.

2.6. Electrónica Analógica

La electrónica analógica son sistemas electrónicos con una señal que varía continuamente en el tiempo, en contraste con la electrónica digital donde las señales solo tienen dos niveles diferentes. El término "análogo" describe la relación proporcional entre una señal y un voltaje o corriente que representa a esa señal [28].

Las señales eléctricas representan información de un circuito o dispositivo electrónico por cambios en su voltaje, corriente, frecuencia, etc. La información es convertida de alguna otra forma física (como sonido, luz, temperatura, presión, posición, etc.) a una señal eléctrica por un transductor el cual convierte de un tipo de energía a otro.

Las señales toman cualquier valor de un rango dado y cada valor de señal representa una información diferente. Cualquier cambio en la señal es representativo y cada nivel de la señal indica un nivel diferente del fenómeno al cual representa.

2.6.1. Acondicionadores de señal.

Los acondicionadores de señal son los elementos de un sistema de medición que ofrecen, a partir de la señal de salida de un sensor, una señal apta para ser presentada o registrada o que permita un procesamiento posterior mediante un equipo o instrumento estándar. Normalmente, son circuitos electrónicos que ofrecen, entre otras funciones, las siguientes:

- Amplificación.
- Filtrado.
- Acoplamiento de impedancias.
- Modulación.
- Demodulación.

Si se considera, por ejemplo, el caso en que una de las etapas de tratamiento de la señal de medida es digital, si la salida del sensor es analógica, que es lo más frecuente, es necesario implementar un convertidor análogo-digital. Éstos tienen una impedancia de entrada limitada, exigen que la señal aplicada sea continua o de frecuencia de variación lenta, y que su amplitud esté entre unos límites determinados, que no suelen exceder de 10 volts. Todas estas exigencias obligan a interponer un acondicionador de señal entre el sensor, que muchas veces ofrece señales de apenas unos mili Volts y el convertidor análogo-digital [29].

2.6.2. Fuentes de Alimentación.

Es un dispositivo que convierte el voltaje de corriente alterna de la red, en uno o varios voltajes, normalmente continuos, que polarizan los circuitos del equipo electrónico al que se conecta.

Las fuentes de alimentación, pueden clasificarse en fuentes de alimentación lineales y conmutadas [28]. Las lineales tienen un diseño relativamente simple, que puede llegar a ser más complejo cuanto mayor es la corriente que deben suministrar, sin embargo su regulación de voltaje es poco eficiente. Una fuente conmutada, de la misma potencia que una lineal, es más pequeña y normalmente más eficiente pero es más compleja y por tanto más susceptible a fallas [28].

a) Fuentes de alimentación lineales

Las fuentes lineales están conformadas por los siguientes bloques: transformación, rectificación, filtrado, regulación y salida.

Según el diagrama de bloques de la figura 2.9, en primer lugar el transformador adapta los niveles de voltaje de C.A. y proporciona aislamiento galvánico. El circuito que convierte la corriente alterna en continua se llama

rectificador, después suelen llevar un circuito que disminuye el rizo como un filtro de capacitor. La regulación, o estabilización del voltaje a un valor establecido, se consigue con un componente denominado regulador de voltaje. La salida puede ser simplemente un capacitor. En el diseño de este tipo de fuentes de alimentación, deben tenerse en cuenta unos puntos concretos a la hora de decidir las características del transformador.

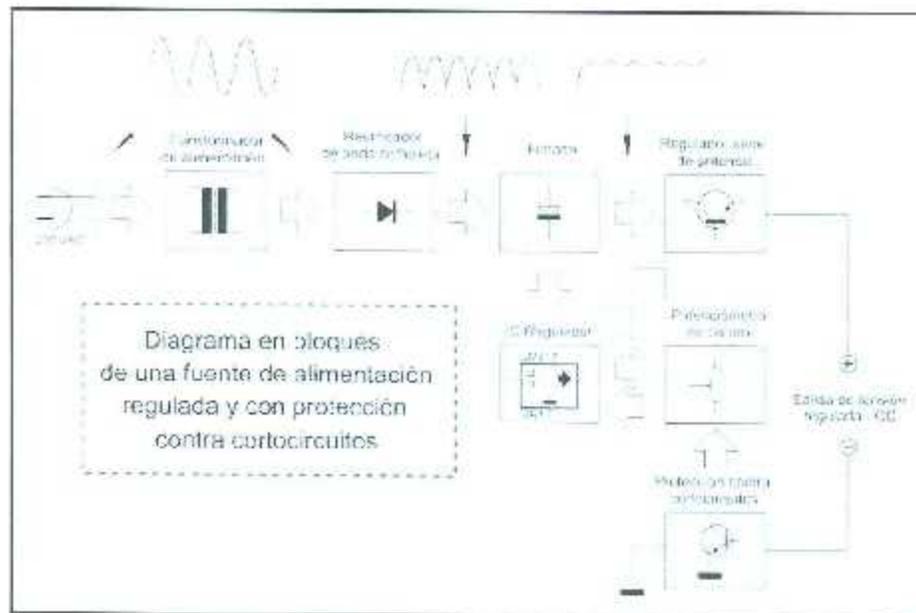


Figura 2.10. Diagrama a bloques de fuente de alimentación lineal.

b) Fuentes de alimentación conmutadas

Dispositivo electrónico que convierte energía eléctrica mediante circuitos en conmutación. Mientras que un regulador de voltaje utiliza transistores polarizados en su región activa de amplificación, las fuentes conmutadas utilizan los mismos conmutándolos activamente a altas frecuencias (20-100 KHz típicamente) entre corte y saturación. La forma de onda cuadrada resultante es aplicada a transformadores con núcleo de ferrita para obtener uno o varios voltajes de salida de corriente alterna, que luego son rectificadas y filtradas para obtener los voltajes de salida de corriente continua. Las ventajas de este método incluyen menor tamaño y peso del núcleo,

mayor eficiencia y por lo tanto menor calentamiento. Las desventajas comparándolas con fuentes lineales es que son más complejas y generan ruido eléctrico de alta frecuencia que debe ser cuidadosamente minimizado para no causar interferencias a equipos próximos a estas fuentes.

Las fuentes conmutadas tienen por esquema: rectificador, conmutador, transformador, otro rectificador y salida.

La regulación se obtiene con el conmutador, normalmente un circuito PWM (Pulse Width Modulation) que cambia el ciclo de trabajo. Aquí las funciones del transformador son las mismas que para fuentes lineales pero su posición es diferente. El segundo rectificador convierte la señal alterna pulsante que llega del transformador en un valor continuo. La salida puede ser también un filtro de capacitor o uno del tipo LC como se muestra en la figura 2.10.

Las ventajas de las fuentes lineales son una mejor regulación, velocidad y mejores características EMC. Por otra parte las conmutadas obtienen un mejor rendimiento, menor costo y tamaño.

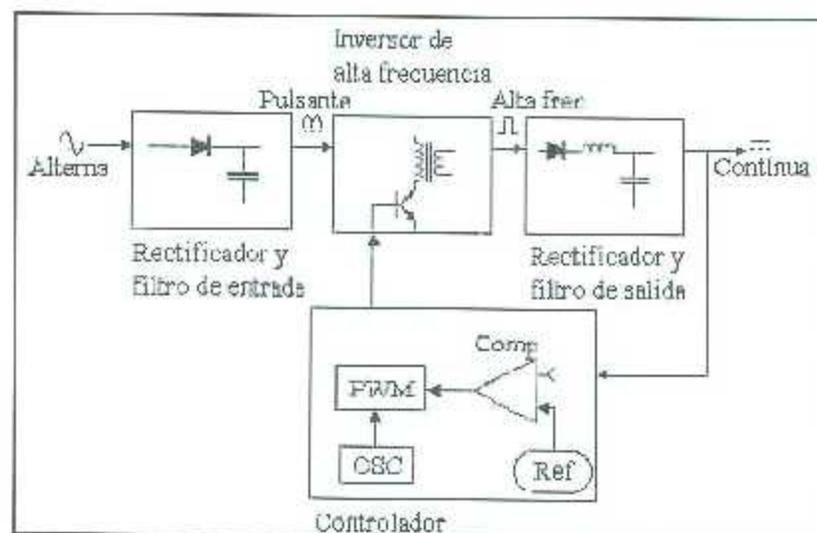


Figura 2.11. Diagrama a bloques de fuente de alimentación conmutada.

2.7. Electrónica Digital

Los sistemas digitales son sistemas que trabajan con variables discretas, que son variables que solo pueden tener un número finito de valores. Por ser de fácil realización los componentes físicos con dos estados diferenciados, es este el número de valores utilizado usualmente para dichas variables, por lo tanto son binarias.

Tanto si se utilizan en proceso de datos, transmisión de información a distancia o en sistemas de control, los sistemas electrónicos digitales realizan operaciones con variables discretas que constituyen números o caracteres alfabéticos. Los números pueden representarse en diferentes sistemas de numeración posicionales o ponderados que se caracterizan por asignar a cada número un conjunto de símbolos o cifras cada una de las cuales tiene asignado un peso.

El sistema de numeración más utilizado en la realización de los sistemas digitales es el de base dos o binario, en el que existen solamente dos símbolos que son el 0 y el 1.

2.7.1. Microcontroladores

Recibe el nombre de controlador el dispositivo que se emplea para el gobierno de uno o varios procesos.

Aunque el concepto de controlador ha permanecido invariable a través de tiempo, su implementación física ha variado frecuentemente. Hace tres décadas, los controladores se construían exclusivamente con componentes de lógica discreta; posteriormente se emplearon los microprocesadores, que se rodeaban con chips de memoria y E/S sobre una tarjeta de circuito impreso. En la actualidad, todos los

elementos del controlador se han podido incluir en un chip, el cual recibe el nombre de microcontrolador. Realmente consiste en un sencillo pero completo computador contenido en el corazón (chip) de un circuito integrado.

Las principales características de los microcontroladores son [30]:

- Unidad de Procesamiento Central (CPU): Típicamente de 8 bits, pero también las hay de 4, 32 y hasta 64 bits con arquitectura Harvard, con memoria/bus de datos separada de la memoria/bus de instrucciones de programa, o arquitectura de von Neumann, también llamada arquitectura Princeton, con memoria/bus de datos y memoria/bus de programa compartidas.
- Memoria de Programa: Es una memoria ROM (Read-OnlyMemory), EPROM (Electrically Programable ROM), EEPROM (ElectricallyErasable/Programable ROM) o Flash que almacena el código del programa que típicamente puede ser de 1 kilobyte a varios megabytes.
- Memoria de Datos: Es una memoria RAM (Random Access Memory) que típicamente puede ser de 1, 2 4, 8, 16, 32 kilobytes.
- Generador del Reloj: Usualmente un cristal de cuarzo de frecuencias que genera una señal oscilatoria de entre 1 a 40 MHz, o también resonadores o circuitos RC.
- Interfaz de Entrada/Salida: Puertos paralelos, seriales (UARTs, Universal Asynchronous Receiver/Transmitter), I2C (Inter-IntegratedCircuit), Interfaces de periféricos seriales (SPIs, Serial Peripheral Interfaces), Red de Area de Controladores (CAN, ControllerArea Network), USB (Universal Serial Bus).
- Otras opciones: Conversores Análogo-Digitales (A/D, analog-to-digital) para convertir un nivel de voltaje en un cierto pin a un valor digital manipulable por el

programa del microcontrolador. Moduladores por Ancho de Pulso (PWM, Pulse-Width Modulation) para generar ondas cuadradas de frecuencia fija pero con ancho de pulso modificable.

El microcontrolador es en definitiva un circuito integrado que incluye todos los componentes de un computador. Debido a su reducido tamaño es posible montar el controlador en el propio dispositivo al que gobierna. En este caso el controlador recibe el nombre de controlador empotrado.

2.7.2. Tarjeta de desarrollo Arduino

Arduino es una plataforma de hardware libre, basada en una placa con un microcontrolador y un entorno de desarrollo, diseñada para facilitar el uso de la electrónica en proyectos multidisciplinarios.

El hardware consiste en una placa con un microcontrolador Atmel AVR y puertos de entrada/salida. Los microcontroladores más usados son el Atmega168, Atmega328, Atmega1280, ATmega8 por su sencillez y bajo costo que permiten el desarrollo de múltiples diseños. Por otro lado el software consiste en un entorno de desarrollo que implementa el lenguaje de programación Processing/Wiring y el cargador de arranque (bootloader) que corre en la placa [31].

Arduino se puede utilizar para desarrollar objetos interactivos autónomos o puede ser conectado a software del ordenador (por ejemplo: Macromedia Flash, Processing, Max/MSP, Pure Data). Las placas se pueden montar a mano o adquirirse. El entorno de desarrollo integrado libre se puede descargar gratuitamente.

Arduino es una plataforma de electrónica abierta para la creación de prototipos basada en software y hardware flexibles muy fáciles de usar, debido a que el IDE con el que trabaja es fácil de aprender a utilizar, y el lenguaje de programación con el que trabaja es simple, pues se creó para artistas, diseñadores, aficionados y cualquier interesado en crear entornos u objetos interactivos. Arduino puede tomar información del entorno a través de sus pines de entrada de toda una gama de sensores y puede afectar aquello que le rodea controlando luces, motores y otros actuadores. El microcontrolador en la placa Arduino se programa mediante el lenguaje de programación Arduino (basado en Wiring) y el entorno de desarrollo Arduino (basado en Processing). Los proyectos hechos con Arduino pueden ejecutarse sin necesidad de conectar a un ordenador, si bien tienen la posibilidad de hacerlo y comunicar con diferentes tipos de software (p.ej. Flash, Processing, MaxMSP). Las placas pueden ser hechas a mano o compradas montadas de fábrica; el software puede ser descargado de forma gratuita. Los ficheros de diseño de referencia (CAD) están disponibles bajo una licencia abierta, así pues eres libre de adaptarlos a tus necesidades.

2.7.3. Comunicación de datos

En un sistema de instrumentación la transmisión es una función que consiste en la interconexión de las diferentes etapas con el objetivo de que circule la información. Cuando una información se comunica en forma binaria a dicho proceso se le denomina comunicación de datos.

2.7.3.1. RS-232

RS-232 (Recommended Standard 232) es una norma para la comunicación serial de datos binarios. La mayoría de las computadoras personales para la comunicación RS-232 tienen un puerto de 9 terminales (DB9 macho) para comunicarse con otras computadoras y todo tipo de periféricos como impresoras,

módems y ratones. Las señales utilizadas así como los conectores para la comunicación serial RS-232 se describen en la figura 2.12 y en la tabla 2.3.



Figura 2.12. Numeración de terminales de los conectores DB9 hembra y macho

Terminal	Señal	Tipo	Descripción
1	DCD	Entrada	Detección de portadora de datos
2	RxD	Entrada	Recepción de datos
3	TxD	Salida	Transmisión de datos
4	DTR	Salida	Terminal de datos preparada
5	GND		Tierra
6	DSR	Entrada	Conjunto de datos preparados
7	RTS	Salida	Solicitud de envío
8	CTS	Entrada	Libre para envío
9	RI	Entrada	indicador de llamada

Tabla 2.3. Señales del puerto RS-232 [8].

Sin embargo se puede lograr una comunicación utilizando únicamente 3 terminales, la de transmisión, la de recepción y la tierra. Las señales con las que trabaja este puerto serie son digitales, de +12V (0 lógico) y -12V (1 lógico), para la entrada y salida de datos, y a la inversa en las señales de control. Dependiendo de la velocidad de transmisión empleada, es posible tener cables de hasta 15 metros. El transmisor-receptor asíncrono universal (UART por sus siglas en inglés) es el encargado de controlar los puertos y dispositivos serie. Las funciones principales del integrado UART son manejar las interrupciones de los dispositivos conectados al puerto serie y convertir los datos de formato paralelo a formato serie, para que puedan ser transmitidos a través de los puertos así como el proceso inverso.

2.8. Lógica difusa

La lógica difusa es una lógica alternativa a la lógica clásica que pretende introducir un grado de vaguedad en las cosas que evalúa. La lógica difusa en comparación con la lógica convencional permite trabajar con información que no es exacta para poder definir evaluaciones convencionales, contrario con la lógica tradicional que permite trabajar con información definida y precisa [32].

Los conjuntos clásicos surgen por la necesidad del ser humano de clasificar objetos y conceptos. Estos conjuntos pueden definirse como un conjunto bien definido de elementos o mediante una función de pertenencia que toma valores de 0 ó 1 de un universo en discurso para todos los elementos que pueden o no pertenecer al conjunto.

2.8.1. Conjuntos Difusos

La necesidad de trabajar con conjuntos difusos surge del hecho que existen conceptos que no tienen límites claros. Un conjunto difuso se encuentra asociado por un valor lingüístico que está definido por una palabra, etiqueta lingüística o adjetivo. En los conjuntos difusos la función de pertenencia puede tomar valores del intervalo entre 0 y 1, y la transición del valor entre cero y uno es gradual y no cambia de manera instantánea como pasa con los conjuntos clásicos.

Cuando más cerca este la pertenencia del conjunto A al valor de 1, mayor será la pertenencia de la variable x al conjunto A, esto se puede ver en la figura siguiente [32].

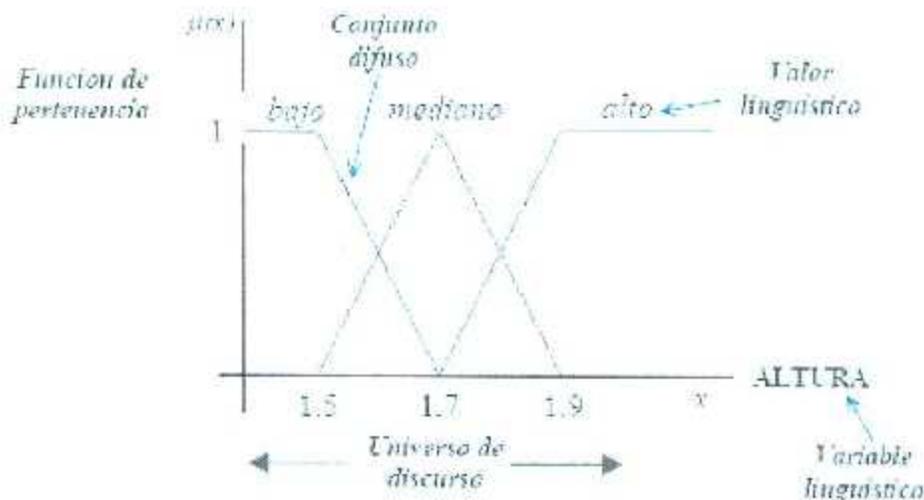


Figura 2.13. Gráfica de las funciones de pertenencia a un conjunto difuso.

2.8.2. Funciones de Pertenencia

Aun cuando cualquier función puede ser válida para definir un conjunto difuso, existen ciertas funciones que son más comúnmente utilizadas por su simplicidad matemática, entre éstas se encuentran las funciones de tipo triangular (Figura 2.13) y trapezoidal (Figura 2.14).



Figura 2.14. Función de transferencia para un conjunto difuso triangular.

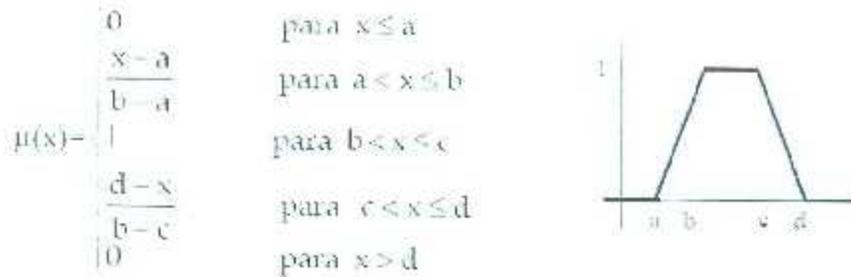


Figura 2.15. Función de transferencia para un conjunto difuso trapezoidal.

2.8.3. El Controlador Difuso

La lógica difusa se aplica principalmente en sistemas de control difuso que utilizan expresiones ambiguas para formular reglas que controlen el sistema. Estos usan el conocimiento experto para generar una base de conocimientos que dará al sistema la capacidad de tomar decisiones sobre ciertas acciones que se presentan en su funcionamiento. Los sistemas de control difuso, cuya estructura se muestra en la figura 2.16, permiten describir un conjunto de reglas que utilizaría una persona para controlar un proceso y a partir de estas reglas generar acciones de control.

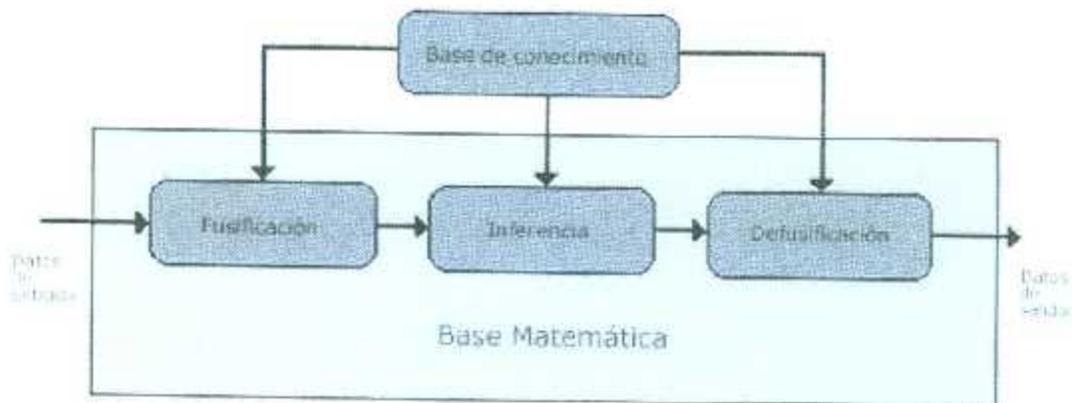


Figura 2.16. La estructura de un controlador difuso.

2.8.4. Fusificación

La fusificación tiene como objetivo convertir valores reales en valores difusos. En la fusificación se asignan grados de pertenencia a cada una de las variables de entrada con relación a los conjuntos difusos previamente definidos utilizando las funciones de pertenencia asociadas a los conjuntos difusos [32].

2.8.5. Base de Conocimiento

La base de conocimiento contiene el conocimiento asociado con el dominio de la aplicación y los objetivos del control. En esta etapa se deben definir las reglas lingüísticas de control que realizarán la toma de decisiones que decidirán la forma en la que debe actuar el sistema [31].

2.8.6. Inferencia

La inferencia relaciona los conjuntos difusos de entrada y salida para representar las reglas que definirán el sistema. En la inferencia se utiliza la información de la base de conocimiento para generar reglas mediante el uso de condiciones, por ejemplo: si caso1 y caso2, entonces acción1 [32].

2.8.7. Defusificación

La defusificación realiza el proceso de adecuar los valores difusos generados en la inferencia en valores reales, que posteriormente se utilizarán en el proceso de control. En la defusificación se utilizan métodos matemáticos simples como el método del Centroide [32].

2.8.7.1. Calculo del centroide

El centroide de un cuerpo es un concepto totalmente geométrico. Su posición solo depende de la geometría del cuerpo, y no de sus propiedades físicas (densidad, homogeneidad, peso específico, etc.). El centroide (C) de un cuerpo

solocoincide con su centro de gravedad(G) si el cuerpo tiene peso específico constante. Si el cuerpo tiene un eje de simetría, su centroide está situado sobre él.

Supongamos una superficie de área A, formada por N superficies de áreas A_i , cuyos centroides son conocidos y se encuentran en las coordenadas x y y, el centroide de la superficie completa puede calcularse mediante las expresiones:

$$\bar{x} = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^N \bar{x}_i A_i$$

Ecuación (2.2).

$$\bar{y} = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^N \bar{y}_i A_i$$

Ecuación (2.3).

La ecuación 2.1 permite calcular la coordenada en "x" del centroide, en función del centroide y el área de cada una de las superficies a considerar, mientras la ecuación 2.2 define la coordenada en "y" del centroide. Ambas ecuaciones se aplican en la generación de la salida (respuesta) del controlador difuso.

Capítulo 3. Metodología

3.1. Diseño y fabricación del destilador solar de alto rendimiento

3.1.1. Diseño del destilador

Analizando los datos obtenidos de la experiencia de uso del destilador solar existente en el Instituto Tecnológico de la Laguna y sus modificaciones se diseñó un equipo de destilación solar tipo dos vertientes basado en el modelo con las mismas dimensiones.

Los pasos para la construcción del equipo se muestran en la figura 3.1, la cual se realizó a través de procesos paralelos de la parte mecánica, eléctrica y de la parte electrónica y programación. El diseño, construcción y ensamblaje del equipo, en primera instancia correspondió a la parte electro-mecánica.

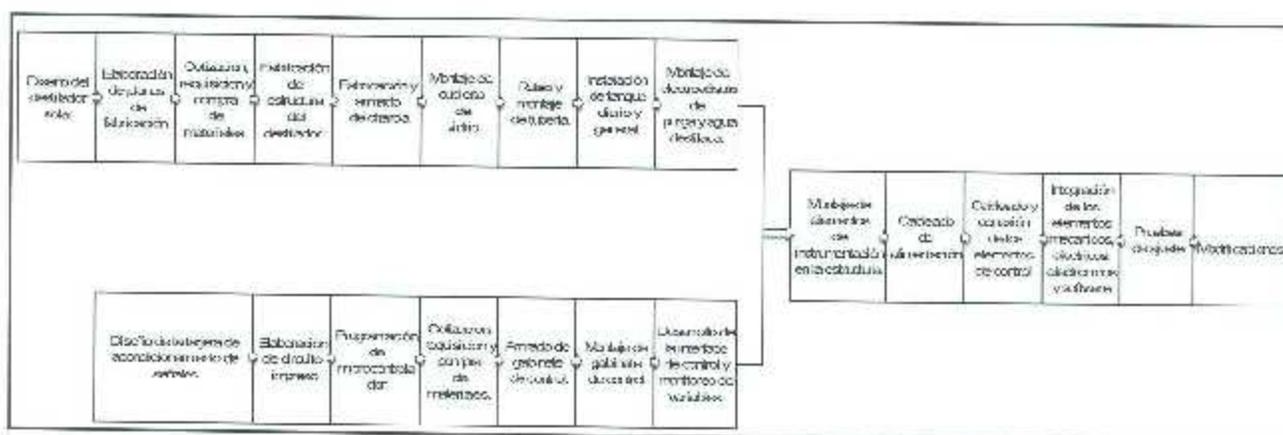


Figura 3.1. Diagrama de flujo del proceso de construcción del destilador solar de alto rendimiento.

Se diseñaron y se modelaron las piezas del nuevo destilador solar por medio del software SolidWorks, para poder generar los planos con especificaciones y así mandar fabricar las piezas con los proveedores.

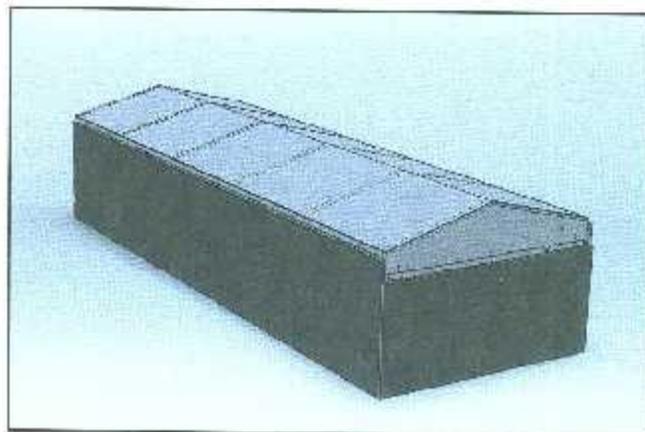


Figura 3.2. Modelo 3D del destilador solar de alto rendimiento.

La Figura 3.2 muestra el diseño simplificado del destilador solar de alto rendimiento, los componentes principales están mostrados en la figura, los cuales son: base soporte, charola, cubierta transparente y revestimiento de hojas de madera con pintura negra.

El agua de grifo entra en la charola, donde se calienta por la absorción de la radiación solar; aumenta la temperatura y comienza a evaporarse.

Se diseñó la charola con dimensiones 5.20m de largo por 1.80m de ancho y 0.20m de profundidad con canaletas laterales a 10 cm de separación de las paredes como se muestra en la figura 3.3(a). El área aproximada del fondo de la charola es de aproximadamente 9.36 m^2 , esta área se considera la superficie activa del destilador, es la más significativa para la captación de la energía solar que permite que el proceso de destilación se lleve a cabo.

El diseño de la charola contempla un pequeño cárcamo como se observa en la figura 3.3(b), para facilitar la purga del agua que se queda en la charola con alta

concentración de sales (alta conductividad eléctrica). Este volumen de agua con alta conductividad tiene que purgarse cuando ya ha rebasado el límite de conductividad especificado en mS/m, de tal manera que permita alimentar el sistema con nueva agua de grifo y evitar las sedimentaciones excesivas de sales en la charola. Ver plano de construcción y especificaciones de la charola en el Anexo V.

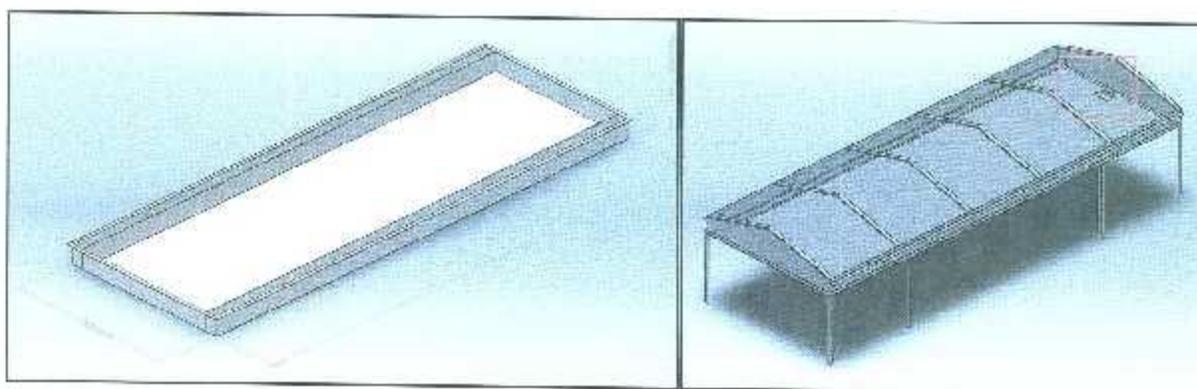


Figura 3.3. Diseño en SolidWorks de la charola del destilador solar de alto rendimiento (a) Dimensiones generales, (b) Diseño que incluye cárcamo para facilitar la purga del sistema.

La base para el destilador se diseñó en perfiles de ángulo de 2x2x1/8", de dimensiones generales 5.25m x 1.9m x 1.28m, refuerzos en semiflecha de 1/4". Ver Anexo IV del plano de fabricación de la base para mayor información.

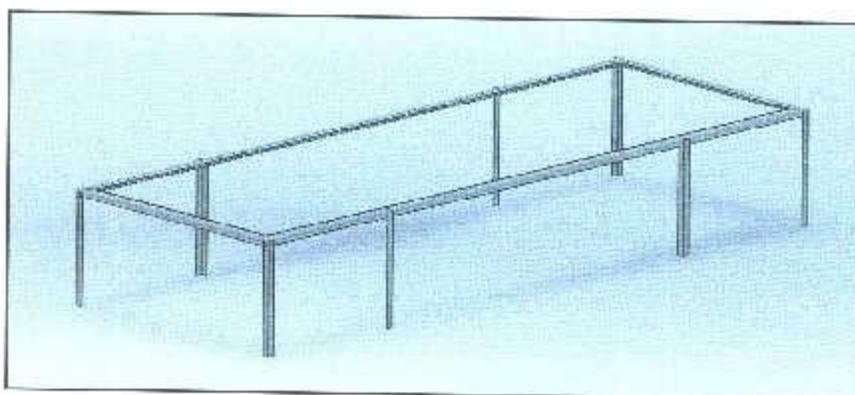


Figura 3.4. Diseño en SolidWorks de la estructura que soportará la charola del destilador solar.

Según el modelo de un destilador de dos vertientes la charola va tapada con una cubierta de vidrio transparente formada por 10 vidrios de aproximadamente 1m

de largo, 0.80 m de ancho y 3mm de espesor. Para montarlos sobre la estructura se decidió acoplar 6 soportes de perfil C distribuidos uniformemente a lo largo del destilador como se observa en la figura 3.5.

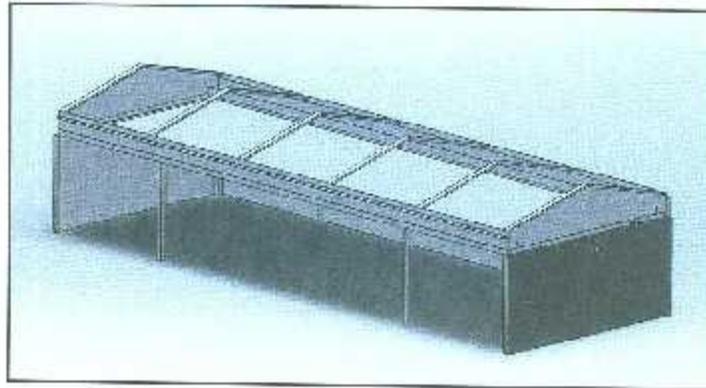


Figura 3.5. Modelo 3D de la distribución de los soportes para la cubierta de vidrio del destilador solar y recubrimiento de madera para evitar corrientes de aire bajo la charola.

Con el fin de minimizar la pérdida de calor en la charola por las corrientes de aire se propone cubrir la base del destilador con hojas de madera sujetadas a la estructura como se observa en la figura anterior.

Así mismo, como se muestra en la figura 3.6, el diseño contempla acoplar paredes laterales desmontables que faciliten la limpieza y mantenimiento del equipo.

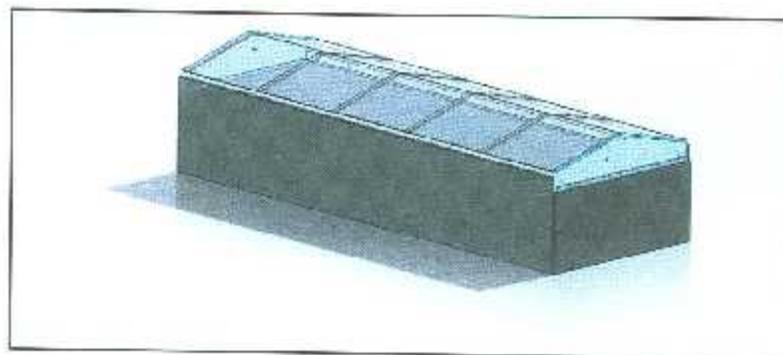


Figura 3.5. Modelo 3D de la distribución de los soportes para la cubierta de vidrio del destilador solar.

En el modelo del destilador anterior dichas paredes se fabricaron de vidrio y se fijaron al resto de los cristales por medio de pegamento especial, sin embargo, las

actividades de limpieza se complicaban pues estas paredes debían quebrarse y reponer con nuevos vidrios una vez terminado el mantenimiento. Se propone la fabricación de estas "tapas" del mismo material de la charola con empaque perimétrico para asegurar el hermetismo. Ir al Anexo X para ver el detalle de fabricación de las tapas laterales.

3.1.1.1. Diseño del Colector Solar Plano como etapa de precalentamiento

Analizando la información disponible, se decide que la opción más adecuada es utilizar un colector solar plano para la etapa de precalentamiento del agua de alimentación. Esta opción cubre los parámetros establecidos: Temperatura de entrada 26°C, Temperatura de salida 80°C (mínima 60°C), producción promedio 100 kg de agua por día.

Se trata de un marco dispuesto de manera tal que mediante la ayuda de una superficie impermeable sea capaz de almacenar el agua que se va a calentar durante el día. El colector a construir, cuyo diseño se presenta en la figura 3.7, tiene una dimensión de 1.20m por 0.60m de ancho. Para conocer a detalle los planos de fabricación del colector solar plano ver Anexo XII, XIII y XIV.

La operación del colector plano requiere la medición y el control de las variables de temperatura de entrada y de salida, para su mejor operación y aprovechamiento.

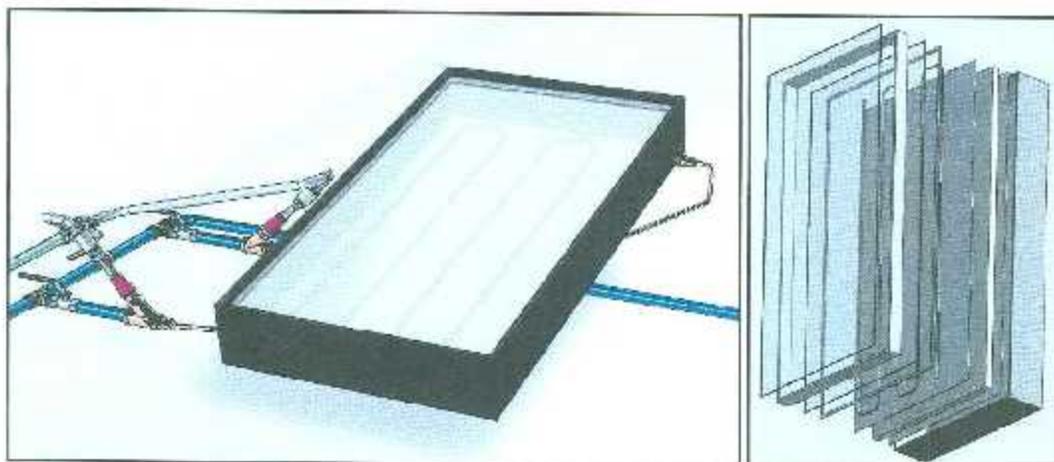


Figura 3.7. Diseño en SolidWorks del colector solar plano utilizado para el precalentamiento de agua de alimentación.

Este equipo puede calentar el agua hasta una temperatura mayor a 80 grados centígrados al medio día solar, la cantidad de agua a calentar aumenta considerablemente en verano.

La parte posterior del absorbente así como los lados se aíslan con fibra de vidrio, se diseñó un revestimiento de una pulgada de fibra de vidrio. Para la cubierta transparente se proponen 2 cristales de 3 mm de espesor de tal manera que se pueda transmitir la radiación solar de alta energía (pequeñas longitudes de onda) hacia el absorbente y retardar la radiación de pequeña energía (grandes longitudes de onda) que es emitida por el absorbente caliente hacia el exterior, así como evitar que las corrientes de aire lo enfríen.

3.1.1.2. Diseño de bases y estructuras para montaje de sensores

El modelo virtual del sistema completo del destilador solar de alto rendimiento permite tener una visión muy cercana al modelo real una vez que sea instalado, por lo que se definieron en él las ubicaciones de los sensores que mejor convenían para el ahorro de espacio, cableado y material.

Son ocho sensores los que se comprenden en el proyecto:

1. Sensor de temperatura en la línea de entrada al calentador solar.
2. Sensor de temperatura en la línea de salida del calentador solar.
3. Sensor de temperatura en la charola del destilador solar.
4. Sensor de nivel de la charola del destilador solar
5. Sensor de conductividad en la charola del destilador solar.
6. Sensor de presión en el destilador solar.
7. Sensor de nivel del tanque de almacenamiento diario del agua producto (Agua destilada).
8. Sensor de conductividad en el tanque de almacenamiento diario del agua producto.

En las figuras 3.8 se indican la posición de cada uno de estos 8 sensores. Para mayor detalle ver Anexo XXIV sobre la ubicación de los elementos del sistema de instrumentación del destilador solar, donde se especifican distancias y dimensiones de cada uno.

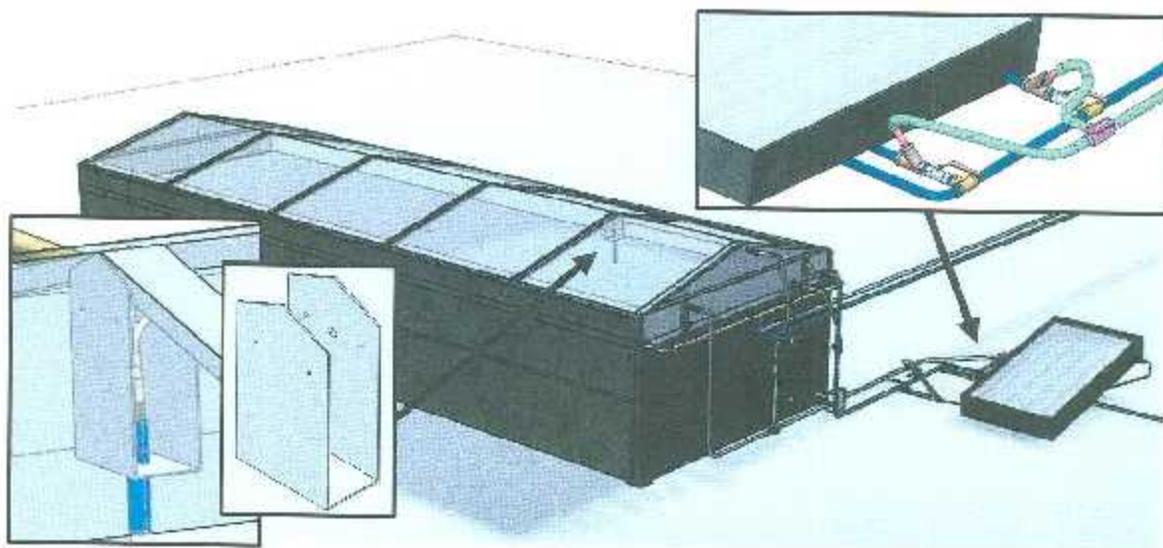


Figura 3.8. Diseño en SolidWorks de la base para sensor ultrasónico de nivel de agua en la charola (Izquierda) y la forma de montaje de los sensores de temperatura de la entrada y la salida de agua del colector solar.

3.1.1.3. Ruteo virtual para cableado y canalización

Finalmente se hace un levantamiento de la zona donde se va a instalar el nuevo destilador. El edificio completo, así como el firme se modelan de acuerdo a las dimensiones levantadas en campo, por medio del software SolidWorks, de tal manera que se puedan generar los planos preliminares para la canalización y cableado del equipo de instrumentación y control. Para ver los planos de canalización y cableado ir a los Anexos XXVI, XXVII y XXVIII.

Se definieron las rutas de la tubería del agua de proceso (agua cruda, agua destilada y agua de purga), de la tubería eléctrica por donde pasarán las líneas de alimentación y señales de los sensores y electroválvulas. Así mismo, se definió la ubicación de las perforaciones necesarias para instalar la tubería.

Cabe mencionar que este modelo realizado en SolidWorks se presenta en escala real, lo que permitió a su vez calcular la volumetría de tubería eléctrica y tubería de proceso (diámetros de tubería, longitud de los tramos, cantidad de codos, registros, reducciones, coples entre otros accesorios). La volumetría del material que arrojó el software utilizado, agilizó el proceso de cotización y compra.

El modelo mostrado en la figura 3.8 permitió planear los trabajos de instalación del equipo y de los elementos de control y medición.

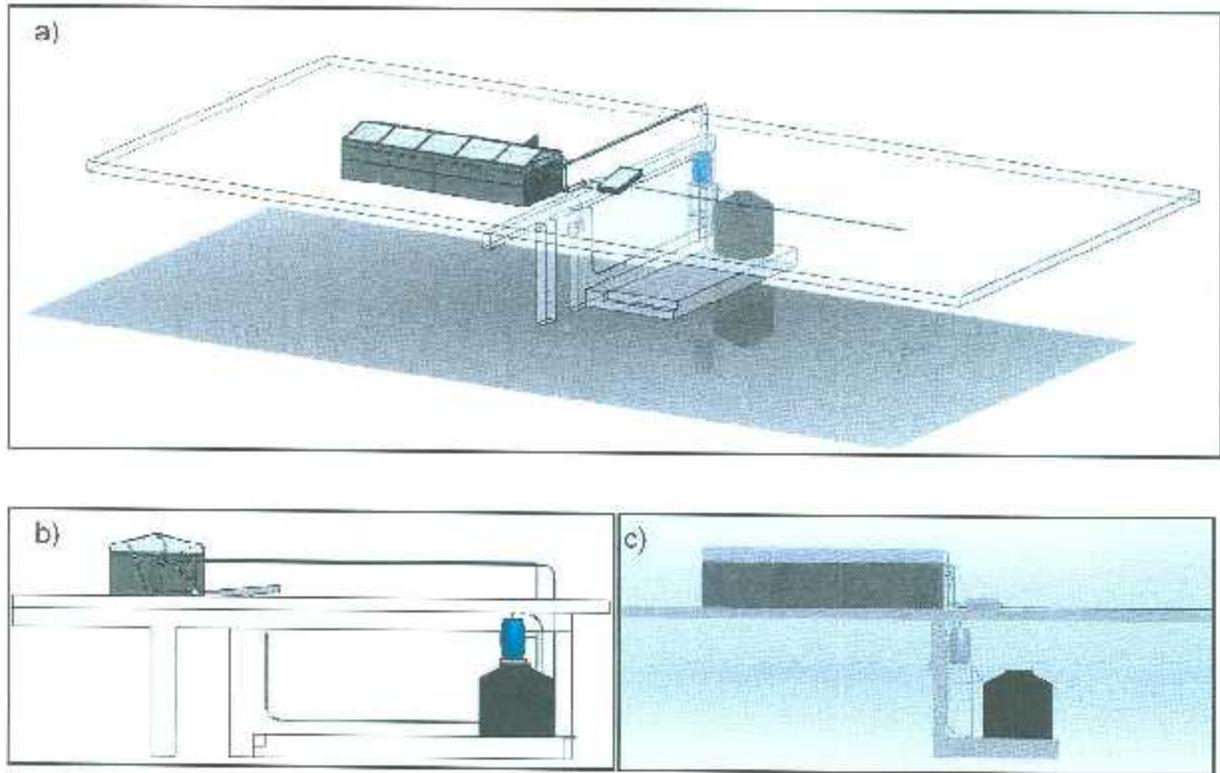


Figura 3.9. Ruteo virtual del cableado y canalización de sensores y actuadores.

3.1.2. Proceso de fabricación

3.1.2.1. Fabricación de la estructura del destilador solar

A continuación, en la tabla 3.1 se presenta la lista de materiales para la fabricación de la estructura del destilador solar y los costos aproximados al 01 de Febrero del 2013.

El costo por la construcción de un destilador de área total 9.36 m² fue de aproximadamente 50 mil pesos. Estos precios no incluyen costos por energía ni transporte.

No.	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo unitario	Total (Pesos MN)
1	Charola de acero inoxidable calibre 18 grado 304 de 5.21 m x 1.82 m x 0.020m con soportes canal de aluminio para cubierta transparente.	pz	1	\$34,650.00	\$ 34,650.00
2	Vidrio 3 mm de espesor de 1m x 0.80m.	pz	10	\$ 225.00	\$ 2,250.00
3	Tubería de acero inoxidable de 1/2 cal 18	Tubo	4	\$ 1,070.00	\$ 4,280.00
4	Válvula clamp de gatillo acero inoxidable	pz	3	\$ 1,050.00	\$ 3,150.00
5	Puerta lateral desmontables con empaque en lámina de acero inoxidable calibre 18.	pz	2	\$ 1,600.00	\$ 3,200.00
6	Consumibles, papelería, tornillería, kit de conexiones, etc	kit	1	\$ 2,000.00	\$ 2,000.00
TOTAL					\$ 49,530.00

Tabla 3.1. Especificación y costos de los materiales para la estructura del destilador.



Figura 3.10. Etapa de corte y ensamble de charola del destilador solar.

Se construye la estructura del destilador solar según el plano del Anexo III, soldando o remachando las láminas de acero inoxidable formando la bandeja con las medidas especificadas en el diseño 3D de SolidWorks. Las etapas de corte y ensamble de las láminas se puede observar en la figura 3.10 antes mostrada.

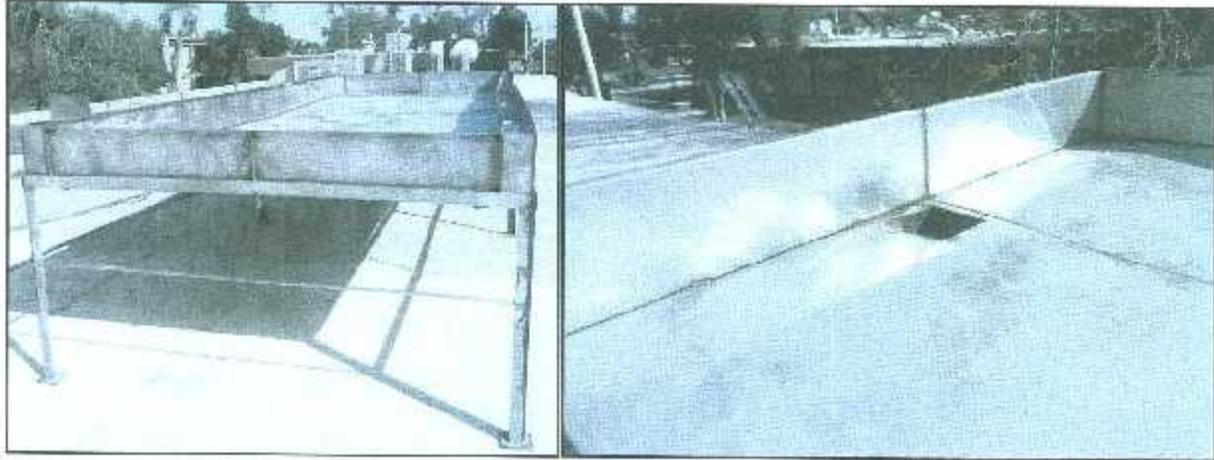


Figura 3.11. Charola y estructura de soporte en etapa de construcción.

La figura 3.11 muestra la charola del destilador ya montada sobre la estructura base, así como el cárcamo para facilitar la purga de la charola.



Figura 3.12. Soportes y cubierta transparente.

Con perfil estructural tipo "C" de aluminio se forman los marcos, según como lo especifican los planos Anexos VII y VIII, donde se montan los cristales de la cubierta transparente. Usando pegamento silicón se fijan los vidrios al marco y a la estructura como se observa en la figura 3.12.

Finalmente, se hacen los barrenos y se sueldan los bridas y conexiones requeridas para el montaje de los sensores, así como las diferentes entradas y salidas de la tubería en el destilador: tubería de agua destilada, tubería de alimentación de agua cruda al sistema y la tubería de purga para el agua residual del proceso del destilador solar de alto rendimiento. Estas conexiones se observan en la figura 3.13.

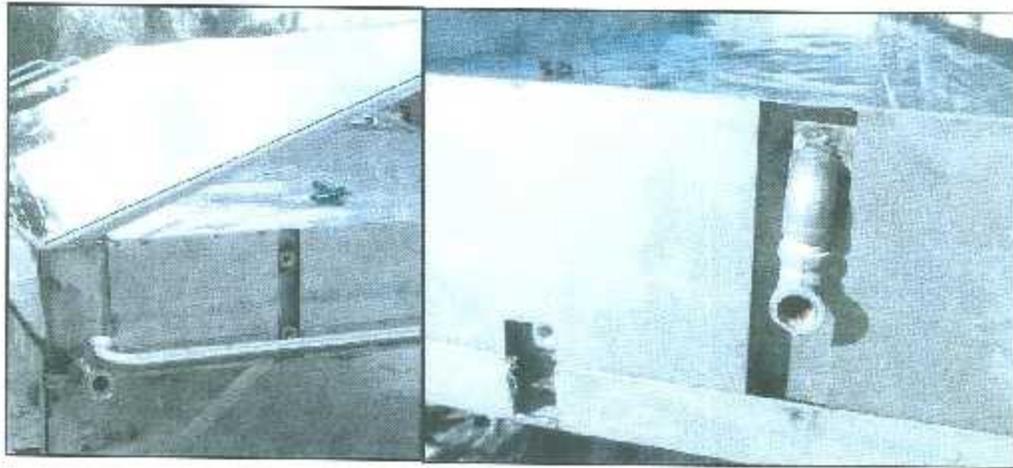


Figura 3 13. Conexiones de tubería y sensores.

3.1.2.2. Fabricación del colector solar para etapa de precalentamiento

En la siguiente tabla se describen los materiales utilizados para la fabricación del colector solar plano que se implementa como etapa de precalentamiento del agua cruda del sistema, así como los costos estimados al mes de Febrero de 2013.

No.	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo unitario	Total (Pesos MN)
1	Lámina de acero galvanizada 3ft X 10ft.	pz	1	\$ 519.00	\$ 519.00
2	Lamina de aluminio comercial 3ft x 10ft x 1/16"	pz	1	\$ 825.35	\$ 825.35
3	Vidrios 3mm espesor	pz	4	\$ 67.00	\$ 268.00
4	Pintura aceite p laca negra resistente a altas temperaturas	ts	2	\$ 42.00	\$ 84.00
5	Tubo de cobre 1/8"	m	20	\$ 22.00	\$ 440.00
6	Tubo de Silicon	pz	4	\$ 20.00	\$ 80.00
7	Aislante	m2	6	\$ 30.00	\$ 180.00
6	Kit de conexiones, reducciones y otros materiales	kit	1	\$ 210.00	\$ 210.00
TOTAL					\$ 2,606.35

Tabla 3.2. Especificación y costos de los materiales para la fabricación de colector solar.

La caja base del colector se fabrica de lámina de acero galvanizado, por lo que el primer paso es el corte, doblado y ensamble de la caja de acuerdo a las dimensiones especificadas en los planos de fabricación, Anexo XV.



Figura 3.14. Proceso de fabricación de colector solar plano. Corte y ensamble de caja base.

Como ya se mencionó el colector plano consta de un serpentín, para el cual se dobla el tubo de cobre para darle la forma. Dicho serpentín va montado sobre una

base de aluminio, la cual a su vez va sujeta a la base de acero galvanizada como se muestra en la figura 3.15.



Figura 3.15 Proceso de fabricación de colector solar plano. etapa de ensamble del serpentín de cobre y la base de aluminio con la caja base.

Una vez que se sujetan ambas bases, se hace la instalación de aislante térmico entre ambas y se fija el ángulo estructural que soportará los cristales de la cubierta. Se cubre la superficie de este semi-ensamble con pintura negro mate incluyendo el serpentín de cobre.

Finalmente se realiza la instalación de la cubierta transparente. El primer vidrio se sella con silicón en el ángulo soporte previamente instalado. Para montar el segundo vidrio primero se sujeta otro perfil de ángulo y se instala. Finalmente se dan los acabados finales de pintura, quedando el colector solar plano listo para su instalación en campo. El prototipo final se muestra en la figura 3.16.



Figura 3.16. Prototipo terminado del colector solar plano.

3.1.3. Instalación

La ubicación del destilador solar de alto rendimiento, a diferencia del destilador anterior, se definió en la parte sur-oeste de la azotea del edificio 12 del Instituto Tecnológico de la Laguna, que es un área sin sombras que favorecen la captación de la radiación durante más horas del día. Así mismo, la orientación definida para el destilador de alto rendimiento se resolvió para que fuera paralelo al recorrido del sol en el firmamento. En la figura 3.17 se puede observar la ubicación del destilador solar durante la etapa de instalación.



Figura 3.17. Ubicación y orientación del destilador solar de alto rendimiento.

Una vez ubicada la estructura, se instala la tubería, iniciando con la línea de agua destilada y agua residual (línea de purga). La tubería es de acero inoxidable y se acopla a la estructura por medio de bridas desarmables y sus respectivas válvulas de gatillo que permitan las futuras actividades de limpieza y mantenimiento de las líneas.



Figura 3.18. Instalación de tubería de agua destilada y tubería de purga.

La figura 3.18 muestra dichas líneas ya instaladas y acopladas al sistema.

Posteriormente se hace la instalación de la línea de agua cruda (alimentación del sistema). La tubería es de Tuboplus hidráulico de la marca Rotoplas, es una tubería que está fabricada de Polipropileno, que le permite ser resistente, ligera

ydurable, además de garantizar cero fugas, ya que las uniones se fusionan convirtiéndolas en una sola pieza de gran resistencia, por medio de termofusión.

Cuenta con una capa antibacterial, la cual garantiza que no haya contaminación del agua. Tiene una capa protectora con filtro UV, de esta manera puede instalarse en exterior y es resistente a climas extremos, soporta temperaturas de -5° a 95° °C.

Sobre esta línea se instala la línea del colector solar plano, por medio de un bypass, por lo que hacer las conexiones con la tubería de tubopluspermite disminuir la pérdida de calor cuando el viento pega en el tubo en el trayecto hacia la entrada del destilador. La línea de agua cruda se puede observar en la figura 3.19.

Una de las desventajas que presenta este tipo de tubería es que se requiere una herramienta especial para hacer las conexiones, un poco costosa, además de requerir instrucción en su manejo, pero resulta más económica que la tubería de cobre.

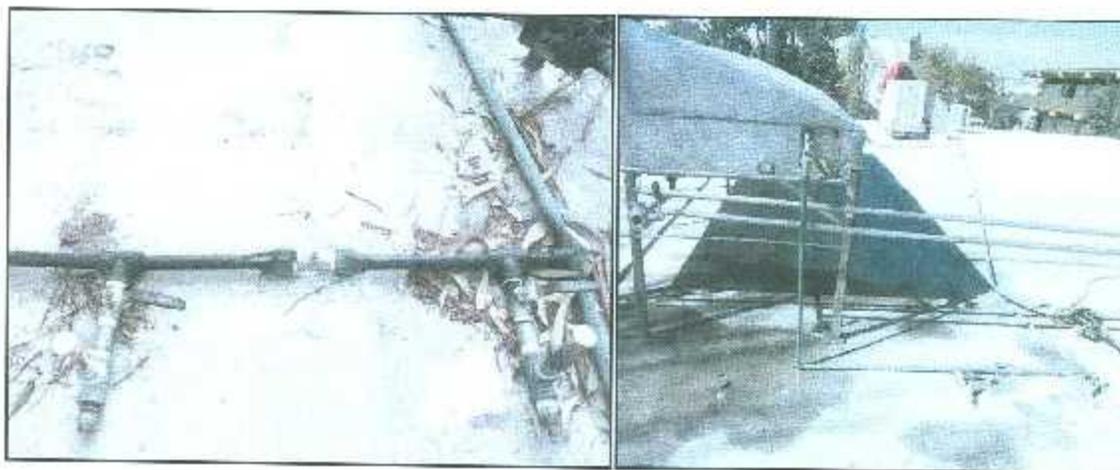


Figura 3.19 Instalación de tubería de alimentación de agua cruda.

Según el diseño del sistema de recolección de agua destilada que produce el destilador solar de alto rendimiento, la línea de agua destilada debe conducir el agua

producto desde las canaletas del destilador hasta un tanque de almacenamiento diario para después conducirla al tanque de almacenamiento general, que se ubican dentro del edificio. Se instala la tubería formando una U como se muestra en la figura 3.20, esto para mantener la presión dentro del destilador, previendo que en su interior se llevaran a cabo procesos de evaporación y condensación alternados.



Figura 3.20. Bajada de tubería de agua destilada y purga, y bypass de en la línea de agua destilada para la habilitación o deshabilitación de U barométrica.

En la figura anterior también se observa la bajada de la línea de purga, sobre la cual se instala una válvula solenoide marca Parker que será manipulada por el sistema de control que se explicará en sección posterior de este documento. La modificación de la línea de purga y la instalación de la nueva válvula se observa en la figura 3.21.



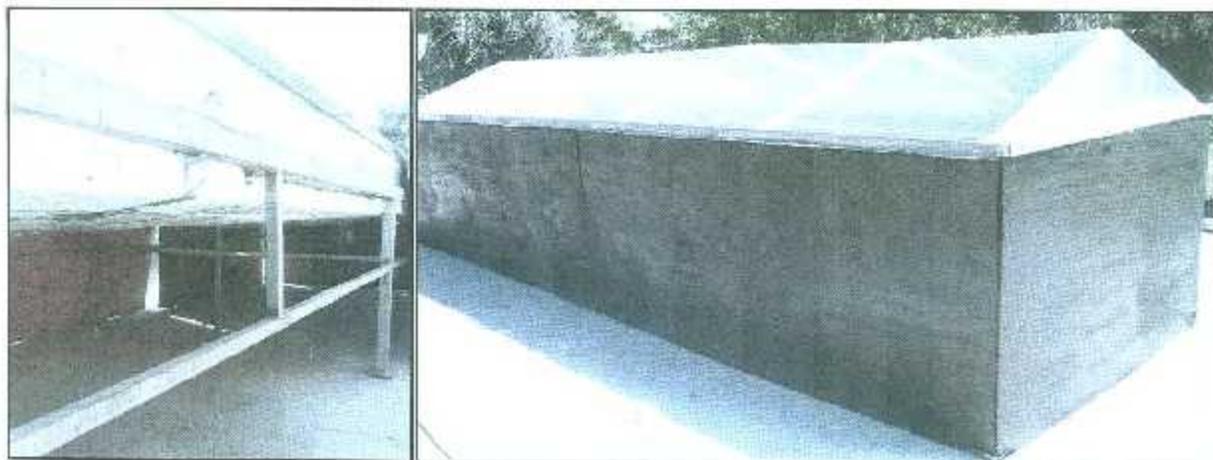


Figura 3.23. A (Izquierda): Instalación aislante térmico debajo de la charola. B (Derecha): Cubierta de madera para cubrir el sistema de las corrientes de aire.

Finalmente se instala el colector solar plano, el cual se acopla al bypass mostrado anteriormente y se fija el ángulo de inclinación por medio de una base sobre la cual descansa el colector. La figura 3.24 muestra el colector ya instalado en campo y conectado al sistema.

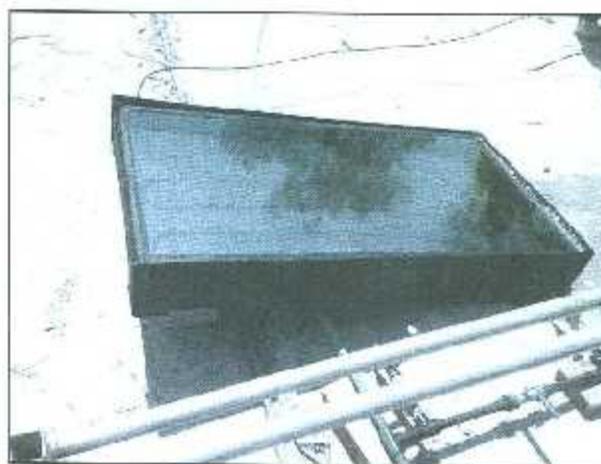


Figura 3.24. Instalación de la etapa de precalentamiento del agua de alimentación (colector solar plano).

3.2. Diseño e implementación del sistema de instrumentación y control.

3.2.1. Hardware

A continuación se muestra una tabla que contiene los elementos del sistema de instrumentación y control implementados en el destilador solar de alto rendimiento. La tabla 3.3 incluye también los costos calculados a febrero de 2013 de cada uno de los materiales.

No.	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo unitario	Total (Pesos MN)
1	Sensor de proximidad ultrasónico. Detec. 100-600 mm	pz	1	\$ 5,120.00	\$ 5,120.00
2	Sensor de proximidad ultrasónico Detec. 200-1500 mm	pz	1	\$ 5,120.00	\$ 5,120.00
3	Aislador de señales análogas de 4...20mA o 0-10Vdc a 24VDC.	pz	1	\$ 1,881.00	\$ 1,881.00
4	Interruptor de temperatura 12-30V CD, 1/4" NPT Macho	pz	3	\$ 1,050.00	\$ 3,150.00
5	PARKER Solenoid Valve 1/2 NPT 24 VDC con bobina conduit	pz	2	\$ 1,600.00	\$ 3,200.00
6	Fuente de alimentación 24 VDC 5 amp.	kit	1	\$ 2,000.00	\$ 2,000.00
7	Notebook Amd C60. Procesador C60, monitor 10.1, puertos VGA y HDMI, disco duro 320 gb, lectora de memorias, memoria DDR3 1 Gb, red inalámbrica, bluetooth, video cámara 0.3 Mega pixeles, teclado en español, USB.	pz	1	\$ 3,992.00	\$ 3,992.00
8	Sensor de presión, rango -5 a +5 pulgadas de agua. Conexión a proceso 1/2" NPT-M. Salida análoga 4-20mA.	pz	1	\$ 11,040.00	\$ 11,040.00
9	Tarjeta de desarrollo Arduino Mega 2560	pz	1	\$ 699.00	\$ 699.00
10	Material Eléctrico		1	\$ 2,780.00	\$ 2,780.00

TOTAL	\$ 38,982.00
--------------	---------------------

Tabla 3.3. Especificación y costos de elementos del sistema de instrumentación.

La figura 3.25 indica la ubicación de los elementos del sistema de instrumentación (Para mayores detalles ver Anexo XXIV). En las siguientes secciones se describirán dichos elementos.

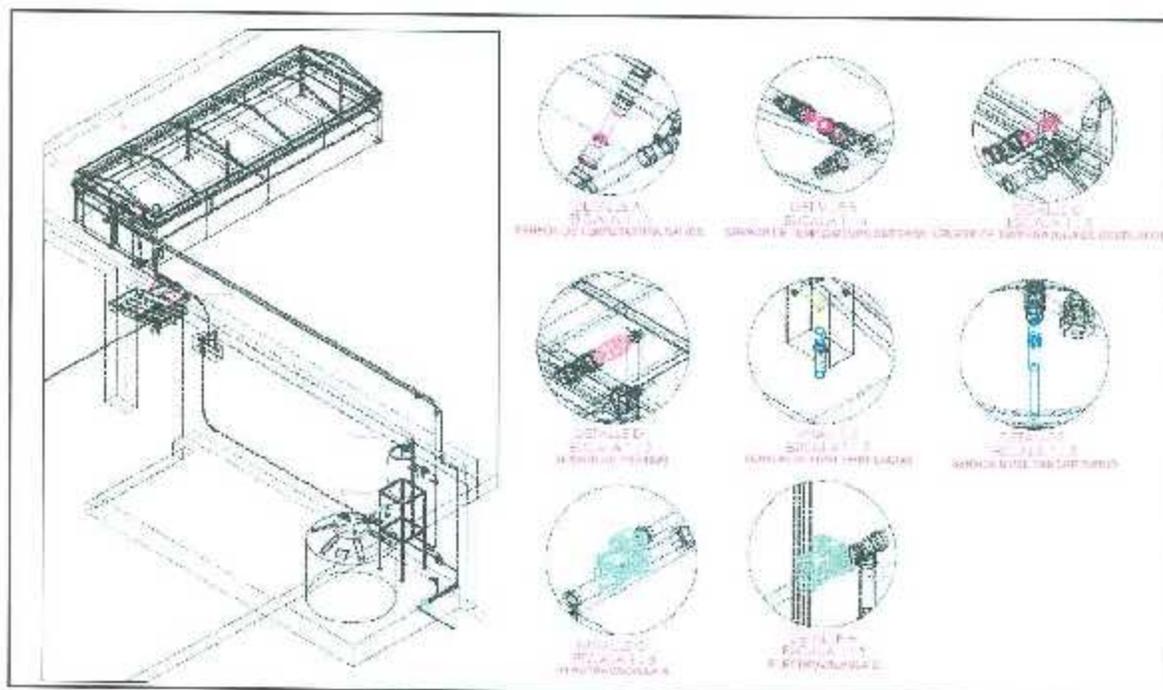


Figura 3.25. Ubicación de sensores y actuadores del sistema de instrumentación del destilador solar.

3.2.1.1. Sensores ultrasónicos de nivel

El sistema cuenta con dos sensores de proximidad ultrasónicos marca Allen Bradley modelo 873P, cuya ficha técnica se incluye en el Anexo XXVI del presente documento. Uno de ellos es utilizado para medir el nivel de agua en la charola del destilador solar y el otro para medir el nivel de agua en el tanque de almacenamiento diario, dato con el que se calcula la producción diaria de agua destilada. Son dispositivos autónomos de estado sólido diseñados para sensor cuerpos sólidos o líquidos sin contacto.

Se fabrican de plástico PBT completamente encapsulados. La circuitería electrónica está protegida contra golpes, vibraciones y contaminación, lo que lo hace apto para instalarlo incluso dentro de contenedores en condiciones de extrema humedad como es el caso de esta aplicación. Las dimensiones de dichos sensores se especifican en la figura 3.26.

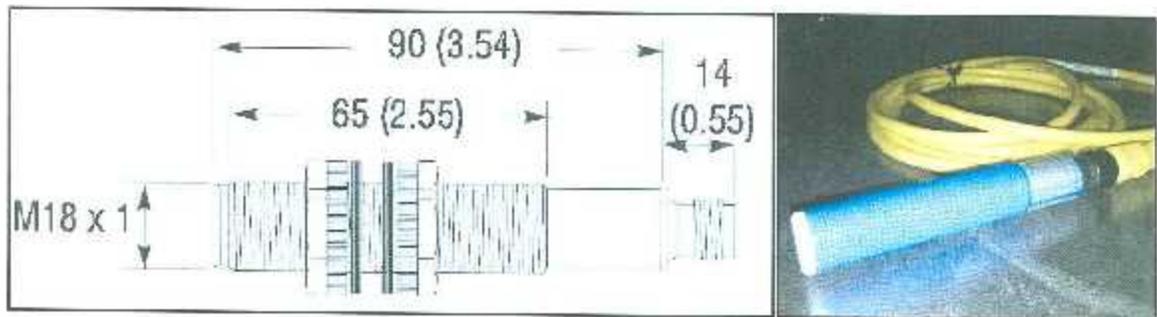


Figura 3.26. Dimensiones del sensor de proximidad ultrasónico 873P.

Estos sensores otorgan una salida analógica de 0 a 10 Vcd, según el rango de sensibilidad seleccionado, que puede ser de 100 a 600 mm, de 200 a 1500mm y de 300 a 2500 mm. Para el proyecto del destilador solar de alto rendimiento se utilizaron las dos primeras escalas mencionadas. Tienen protección completa contra cortos circuitos, sobrecarga, pulso falso, ruido y polaridad inversa.

Para medir el nivel de agua en la charola se utiliza el sensor de proximidad ultrasónico con número de parte 873P-DBAV1-D4 de 18 mm de diámetro. el cual otorga una salida análoga de 0 a 10 Vcd, donde 0Vcd equivale a una distancia de proximidad del objeto de 100mm, mientras 10 Vcd en la salida equivale a 600 mm de distancia hasta el objeto a medir, en este caso, el nivel de agua.

Debido al diseño a dos aguas de la cubierta del destilador, se tuvo que diseñar una base especial para este sensor, que permitiera instalarlo sin utilizar herramientas como taladro o caladora, ya que, como se puede observar en la figura 3.27, el espacio

reducido dentro del destilador impedía maniobrar estas herramientas. El diseño final de la base del sensor se encuentra en el Anexo XXII.

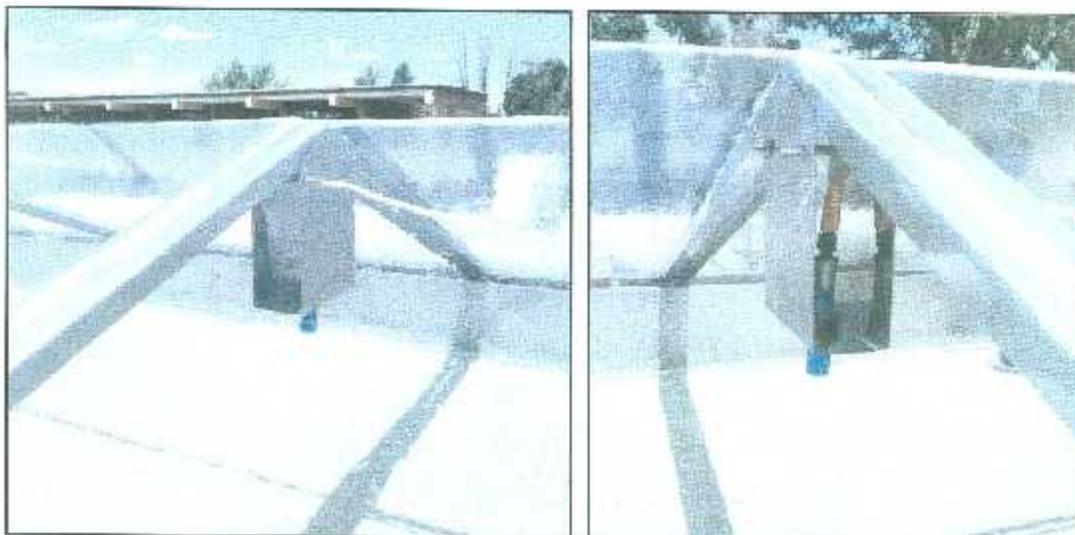


Figure 3.27. Montaje de base y sensor de nivel de agua en charola.

Para medir el nivel de agua destilada (agua producto) en el tanque de almacenamiento diario se utiliza el sensor 873P-DBAV2-D4, que también tiene una salida análoga, cuyo valor de 0Vcd equivale a una distancia de proximidad del objeto de 200mm, mientras la señal de 10V corresponde a 1500 mm de distancia. Dicho sensor se montó sobre la tapa del contenedor diario, como se muestra en la figura.

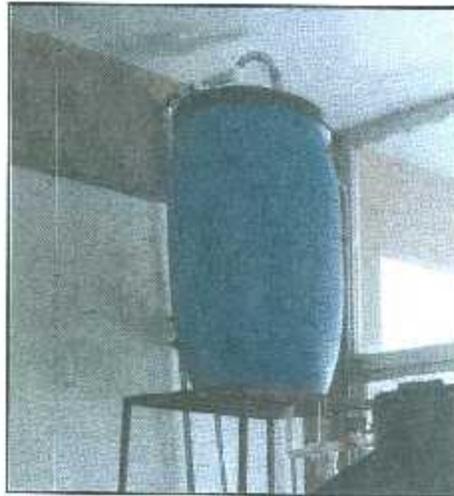


Figura 3.28. Montaje de sensor de nivel de agua destilada en tanque de almacenamiento diario.

3.2.1.2. Sensores de temperatura

El sistema de instrumentación también cuenta con tres sensores de temperatura, que realizan las mediciones correspondientes a las temperaturas de entrada y salida de la etapa de precalentamiento y la temperatura del agua en la charola del destilador solar.

Se trata de interruptores de temperatura sin pantalla modelo 837E de la marca Allen Bradley, los cuales pueden medir la temperatura media en líquidos, gases y vapores en el rango de -50 a 150°C (-58 a 302°F). Estos sensores cuentan con salida analógica de 4 a 20 mA que es proporcional al rango de temperatura especificado. Su estructura envolvente es de acero inoxidable por lo que resiste a la corrosión.

Los tres sensores instalados tienen una sonda de inserción (superficie de varilla que se pone en contacto con el fluido a medir) de 100 mm de longitud con conexión a proceso de $\frac{1}{4}$ " NPT macho. Las dimensiones generales del sensor se pueden observar en la siguiente figura 3.29.

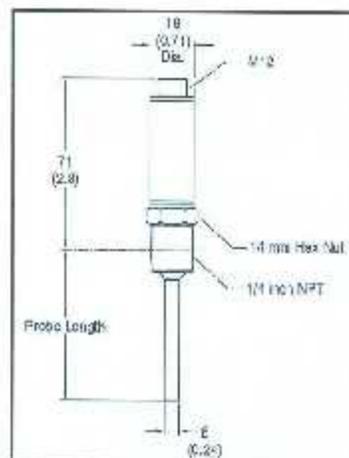


Figura 3.29. Dimensiones aproximadas del interruptor de temperatura sin pantalla 837E [mm (in)].

Los sensores de temperatura de entrada y salida del colector solar, con número de parte 837E-TD1BN1A2-D4, se instalaron en la línea de agua cruda, donde se

acondicionó el bypass antes mencionado. Sobre la tubería de entrada y la tubería de salida del colector solar plano se acoplaron conectores "Y" para montar los interruptores de temperatura 837E como se observa en la figura 3.30.

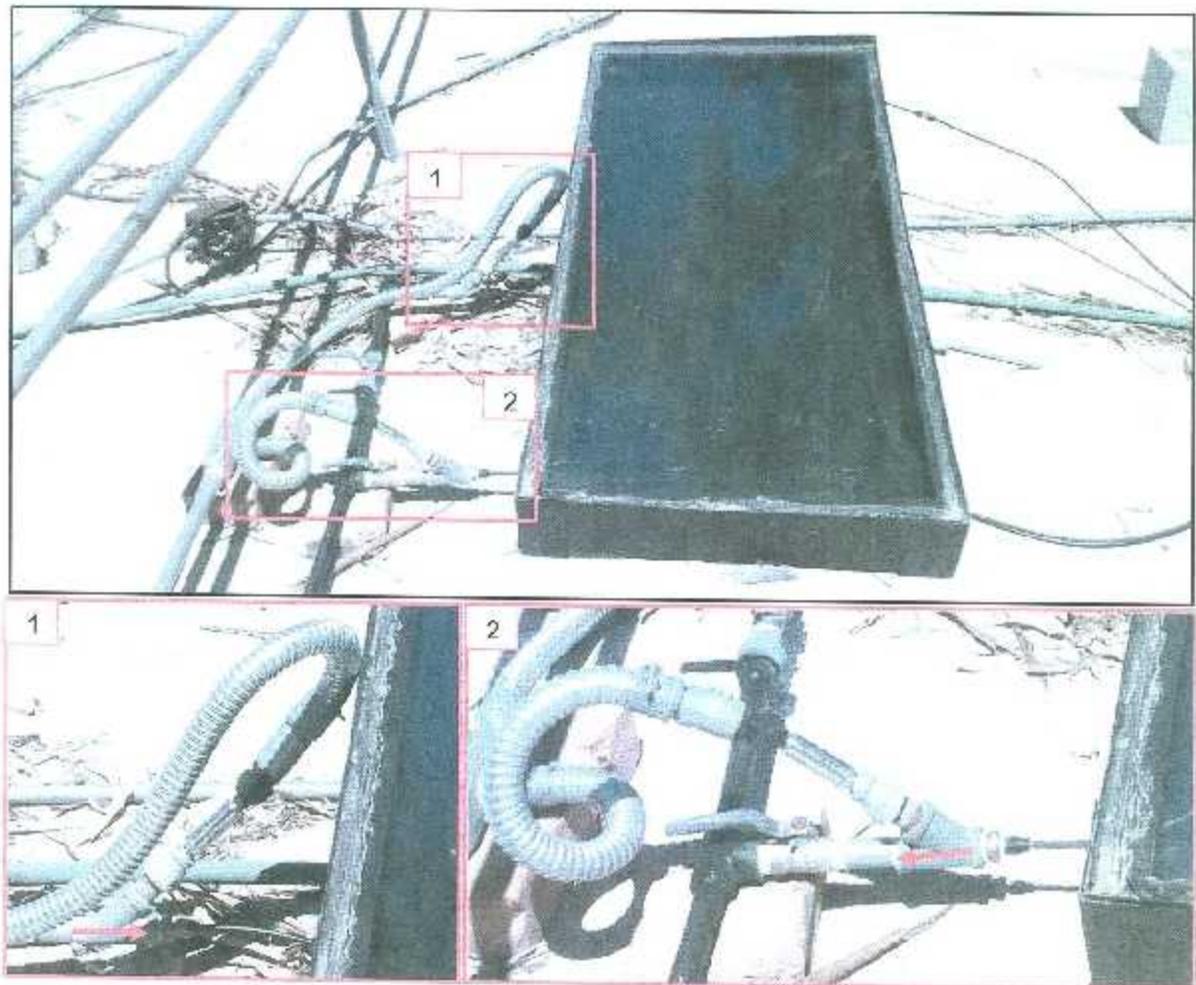


Figura 3.30. Sensores de temperatura de entrada (1) y temperatura salida (2) del colector solar plano.

Se instala el tercer sensor en la charola del destilador solar, como se muestra en la figura 3.31, para medir la temperatura que alcanza el agua durante todo el proceso que ocurre dentro del equipo. Para el montaje de este sensor se soldó un conector hembra de $\frac{1}{4}$ " a la estructura de la charola.

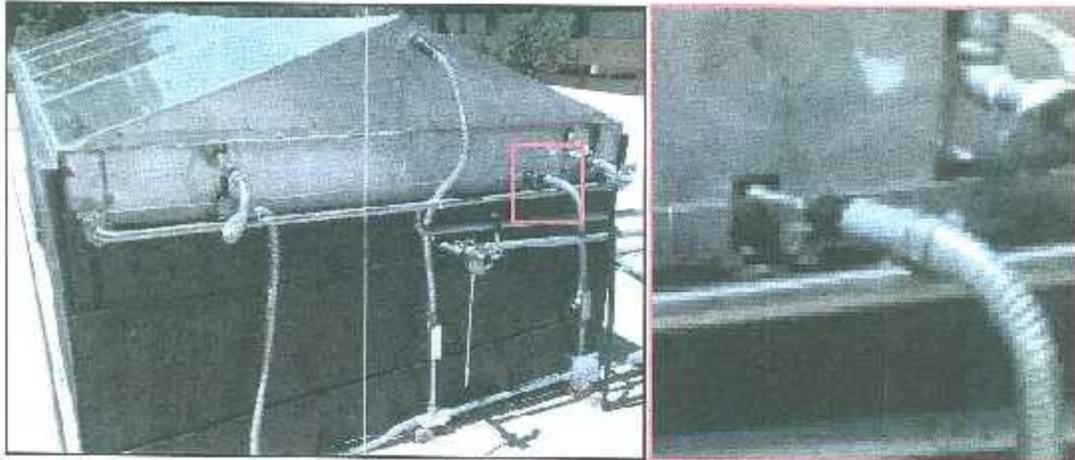


Figura 3.31. Sensor de temperatura del agua en charola de destilador solar.

3.2.1.3. Sensor de presión

Se requiere que el agua dentro del destilador logre temperaturas relativamente altas para favorecer el proceso de evaporación, aumentando exponencialmente la presión de vapor del agua. Para asegurar la hermeticidad del equipo o detectar alguna posible fuga se utiliza un sensor de presión, marca PMC, Modelo PT/EL-SAN-CERV-CV/P, el cual tiene un rango de medición de -5 A +5 pulgadas de agua. El sensor se muestra en la figura 3.32.



Figura 3.32. Sensor de presión marca PMC.

Dicho sensor tiene una conexión a proceso de 1/2" NPT macho y una salida analógica de 4 a 20mA y una precisión de $\pm 0.25\%$ de la escala total. Para poder instalarlo en la estructura de la charola fue necesario acoplar reducciones hasta 1/4" NPT como se muestra en la figura 3.33.



Figura 3.33. Montaje de sensor de presión en estructura de charola.

3.2.1.4. Sensor de conductividad

Para medir la conductividad se desarrolla un sensor de conductividad que consiste en un par de barras de acero inoxidable montadas sobre una base de plástico con una distancia específica para que la medición sea uniforme. Se reutilizó el electrodo del medidor CL8 de la figura 3.34 existente en el laboratorio, por el que se hace circular corriente continua, proveniente del propio microcontrolador, a través de las varillas y se comparan las variaciones de voltajes en el circuito mostrado.

El voltaje entregado se conecta a la entrada analógica del microcontrolador Arduino de tal manera que se pueda manipular el valor binario de dicha señal para realizar la conversión a $\mu\text{S}/\text{cm}$.

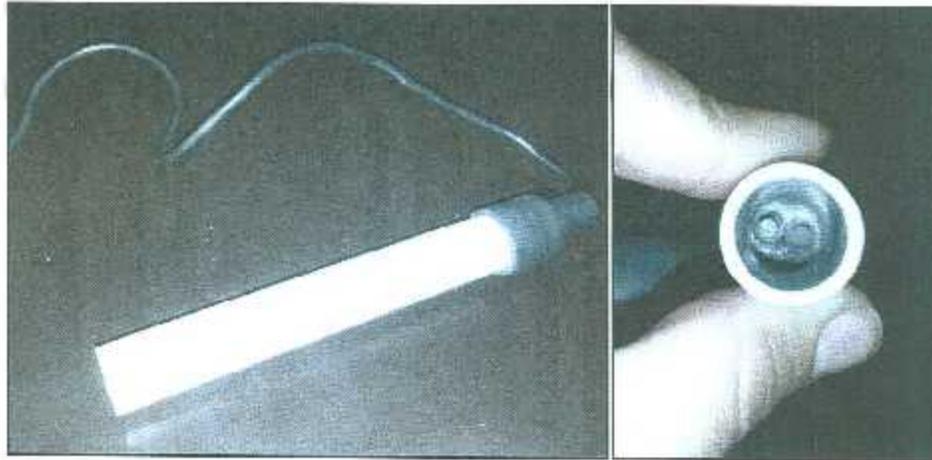


Figura 3.34. Base con electrodos con recubrimiento reutilizada en el sensor de conductividad eléctrica desarrollado para la aplicación.

Los conectores los electrodos se acoplan al circuito para medir la caída de voltaje en una resistencia conocida (100 ohms). La línea de este voltaje se conecta a la entrada del micro controlador.

3.2.1.5. Válvulas solenoides (Actuadores del sistema)

El sistema de instrumentación contempla dos actuadores, uno para controlar la purga del agua en la charola y otro para controlar el flujo de agua destilada del tanque de almacenamiento diario al tanque general. Se trata de dos válvulas solenoides marca Parker, con bobina de 24Vcd tipo conduit (la bobina trae integrado conector directo para tubería tipo conduit utilizada para la canalización, ver figura 3.34).

La conexión a proceso de estas válvulas es de ½" NPT y son normalmente cerradas. La primera (figura 3.35A) se instala en la línea de purga y la segunda (figura

3.35B) se instala en la tubería que conecta el tanque de almacenamiento diario al tanque de almacenamiento general de agua producto.



Figura 3.35. A. (Izquierda) Válvula solenoide en línea de purga de charoia. B (Derecha) Válvula solenoide instalada on tubería que une tanque de almacenamiento diario con tanque general.

3.2.1.6. Fuente de alimentación

El sistema de instrumentación cuenta con una fuente de alimentación de 24 a 28 Vcd, modelo 1606-XLS120E marca Allen Bradley, de 120W y 5A, que es la capacidad suficiente para cubrir la demanda de corriente de todo el sistema. El consumo de los sensores es del orden de los mA mientras las válvulas consumen menos de la mitad de un amperio.



Figura 3.36. Fuente de alimentación marca Allen Bradley montada en gabinete eléctrico.

Como puede observarse en la figura 3.36 el montaje de la fuente es en riel din del gabinete principal.

3.2.1.7. Tarjeta de desarrollo Arduino MEGA 2560 para el control del sistema de instrumentación.

Se utiliza para esta aplicación una placa de desarrollo del microprocesador ATmeg1280. Es una placa Mega 2560, tiene 54 entradas/salidas digitales, de las cuales 14 proporcionan salida PWM, 16 entradas digitales, 4 puertos serie por hardware, un cristal oscilador de 16MHz, conexión USB, entrada de corriente, conector ICSP y botón de reset.

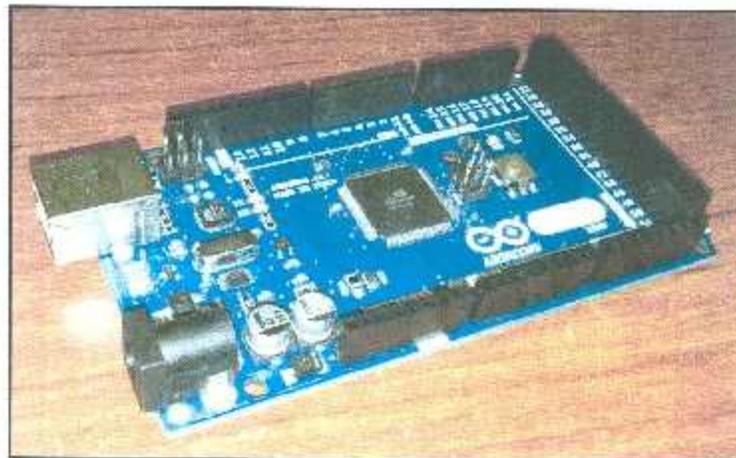


Figura 3.37. Tarjeta de desarrollo Arduino MEGA 2560.

Se conecta directamente a la computadora con el cable USB, y puede alimentarse con una fuente externa de entre 6 a 20 voltios. Si el voltaje suministrado es inferior a 7V el pin de 5V puede proporcionar menos de 5V y la placa puede volverse inestable, si se usan más de 12V los reguladores de voltaje se pueden sobrecalentar y dañar la placa. El rango recomendado es de 7 a 12 voltios.

La longitud y amplitud máxima de la placa es de 4 y 2.1 pulgadas respectivamente, con el conector USB y la conexión de alimentación sobresaliendo de estas dimensiones. Tres agujeros para fijación con tornillos permiten colocar la placa en superficies y cajas eléctricas.

Los pines utilizados de la tarjeta para leer las señales de los sensores y para arrojar las salidas a los actuadores se configuraron de la siguiente manera, según la figura 3.38:

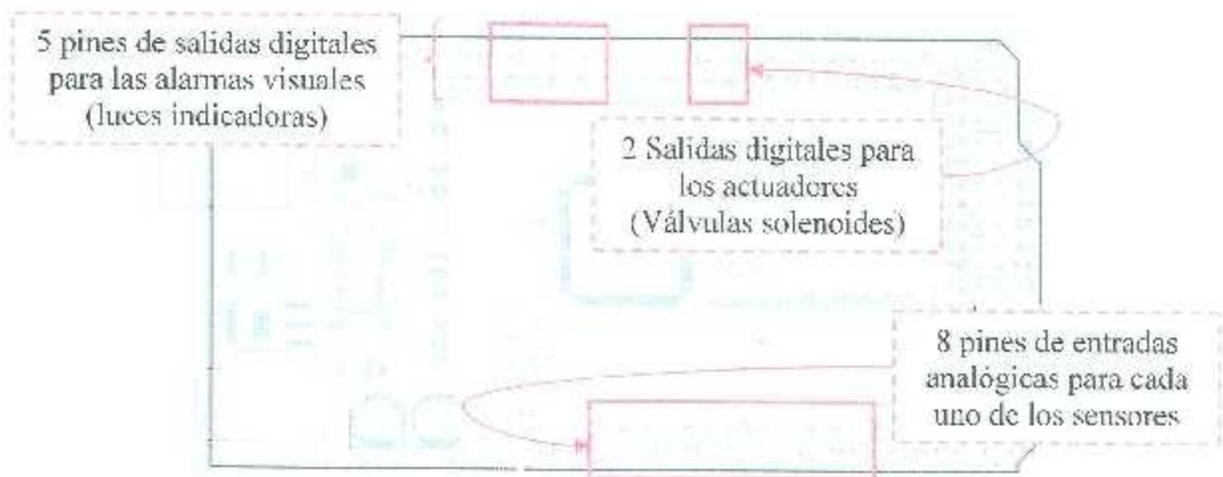


Figura 3.38. Configuración de los pines de la placa Arduino MEGA 2560.

Los pines de alimentación son los siguientes:

VIN: La entrada de voltaje a la placa Arduino cuando se está usando una fuente externa de alimentación. Se puede proporcionar voltaje a través de este pin, o si se está alimentado a través de la conexión de 2.1mm, acceder a ella a través de este pin.

5V. La fuente de voltaje estabilizado usado para alimentar el microcontrolador y otros componentes de la placa. Esta puede provenir de VIN a través de un regulador integrado en la placa, o proporcionada directamente por el USB u otra fuente estabilizada de 5V.

3V3. Una fuente de voltaje a 3.3 voltios generada en el chip FTDI integrado en la placa. La corriente máxima soportada es de 50mA.

GND. Pines de conexión a tierra.

Cada uno de los 54 pines digitales pueden utilizarse como entradas o como salidas. Las entradas y salidas operan a 5 voltios. Cada pin puede proporcionar o recibir una intensidad máxima de 40mA y tiene una resistencia interna (desconectada por defecto) de 20-50kOhms. Además, algunos pines tienen funciones especializadas:

- Serie 0: pin 0 (RX) y pin1 (TX)
- Serie 1: pin 19 (RX) y pin 18 (TX)
- Serie 2: pin 17 (RX) y pin 16 (TX)
- Serie 3: pin 15 (RX) y pin 14 (TX).

Usado para recibir (RX) y transmitir (TX) datos a través de puerto serie TTL.

PWM: de 0 a 13. Proporciona una salida PWM (Pulse Wave Modulation, modulación de onda por pulsos) de 8 bits de resolución (valores de 0 a 255) a través de la función `analogWrite()`.

SPI: 50, 51, 52, 53. Estos pines proporcionan comunicación SPI.

LED: 13. Hay un led integrado en la placa conectado al pin digital 13, cuando este pin tiene un valor HIGH(5V) el LED se enciende y cuando este tiene un valor LOW(0V) este se apaga.

Arduino Mega tiene 16 entradas analógicas, y cada una de ellas proporciona una resolución de 10bits (1024 valores). Por defecto se mide de tierra a 5 voltios, aunque es posible cambiar la cota superior de este rango usando el pin AREF y la función `analogReference()`.

AREF. Voltaje de referencia para las entradas analógicas.

Reset. Suministrar un valor LOW(0V) para reiniciar el microcontrolador.

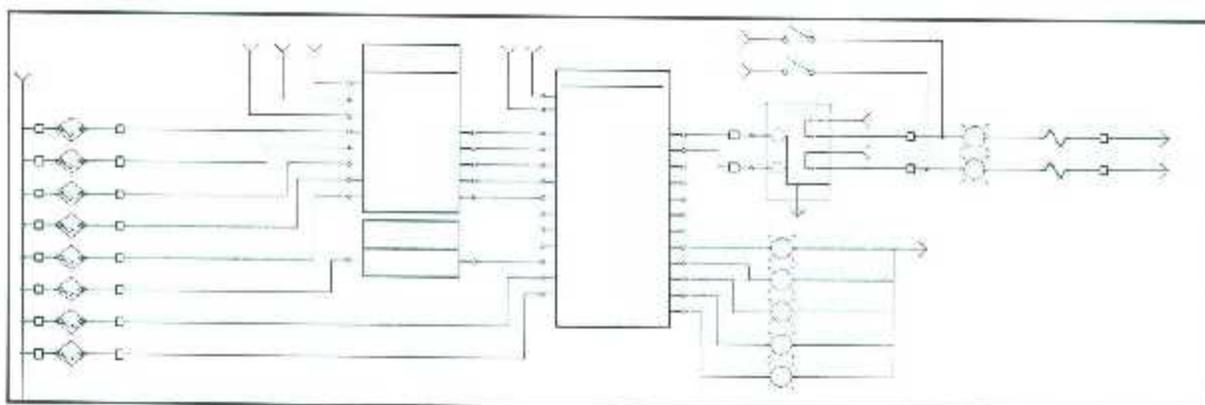


Figura 3.39. Diagrama de conexiones eléctricas del sistema de instrumentación.

El diagrama mostrado en la figura 3.39 muestra la configuración de las conexiones eléctricas de la placa de desarrollo y los demás elementos del sistema. Para revisar el detalle de las conexiones ver Anexo XXX.

La placa Mega tiene 128KB de memoria flash para almacenar código (4KB son usados para el arranque del sistema). El microprocesador de la tarjeta tiene 8 KB de memoria SRAM y 4KB de EEPROM.

Facilita en varios aspectos la comunicación con el ordenador, con otro Arduino u otros microcontroladores. El ATmega1280 proporciona cuatro puertos de comunicación vía serie UART TTL (5V). Un chip FTDI FT232RL integrado en la placa canaliza esta comunicación serie a través del USB y los drivers FTDI, proporcionan un puerto serie virtual en el ordenador.

El ATmega1280 también soporta la comunicación I²C (TWI) y SPI. El software de Arduino incluye una librería Wire para simplificar el uso del bus I²C. Para el uso de la comunicación SPI, ver la hoja de especificaciones del ATmega1280.

3.2.1.8. Etapa de acondicionamiento de señales

Como se mencionó en la sección anterior las entradas analógicas de la tarjeta de desarrollo Arduino aceptan un voltaje análogo de 0 a 5 V, señal que a excepción de los dos sensores de conductividad, no es compatible con las salidas que arrojan los seis sensores restantes.

Dos de dichos seis sensores otorgan una salida análoga de 0 a 10 V, se trata de los sensores de proximidad ultrasónicos; por otro lado la salida análoga de los tres sensores de temperatura es de 4 a 20 mA, y el sensor de presión que también tiene una salida de 4 a 20 mA, se hace pasar por una etapa intermedia de acondicionamiento que la convierte en una señal de 0 a 10V. Se diseña un circuito acondicionador de señal mostrado en la figura 3.40, que se encarga de acoplar la señal de cada uno de los sensores a las entradas análogas del microcontrolador.

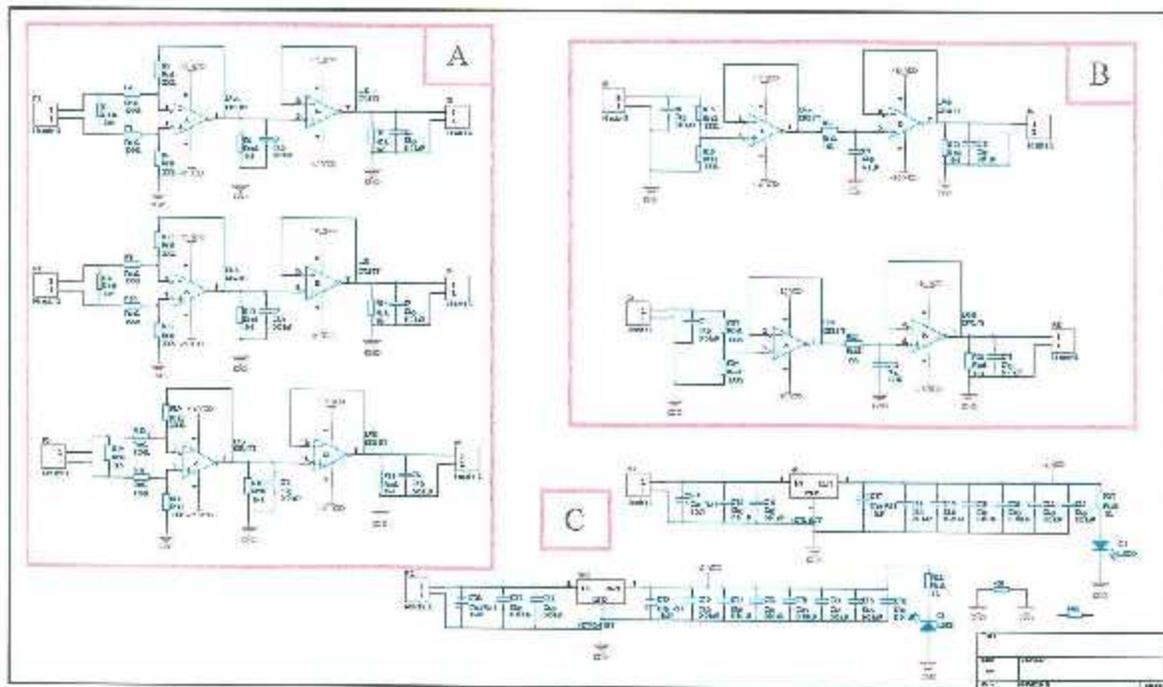


Figura 3.40. Diagrama esquemático de la tarjeta de acondicionamiento de señales. A) Conversión 4-20 mA a 0-5V. B) Conversión 0-10V a 0-5V. C) Alimentación de la tarjeta.

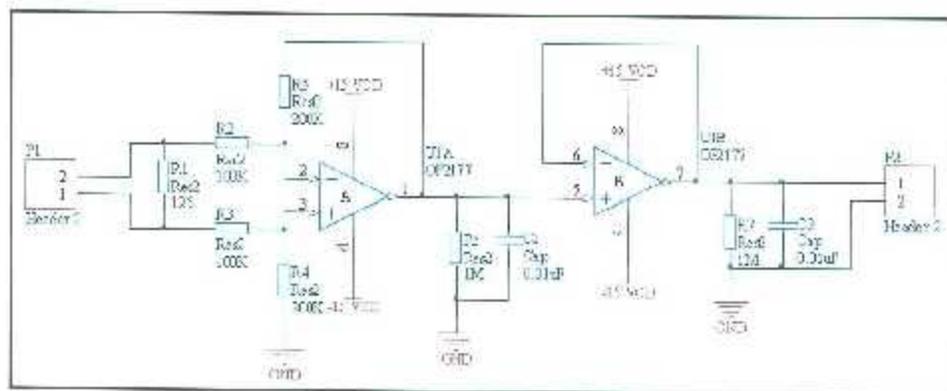


Figura 3.41 Diagrama esquemático del circuito de conversión de señal 4-20 mA a señal analógica 0-5V.

La figura 3.41 describe el circuito diseñado para acondicionar las señales provenientes de los sensores de temperatura:

- A y B es el identificador de los operacionales.
- Rx el identificador de cada de resistencia.
- Cx el identificador de cada de capacitor.

- Px indicador del número del borne

Las capacidades de cada elemento, se indican en cada elemento gráfico.

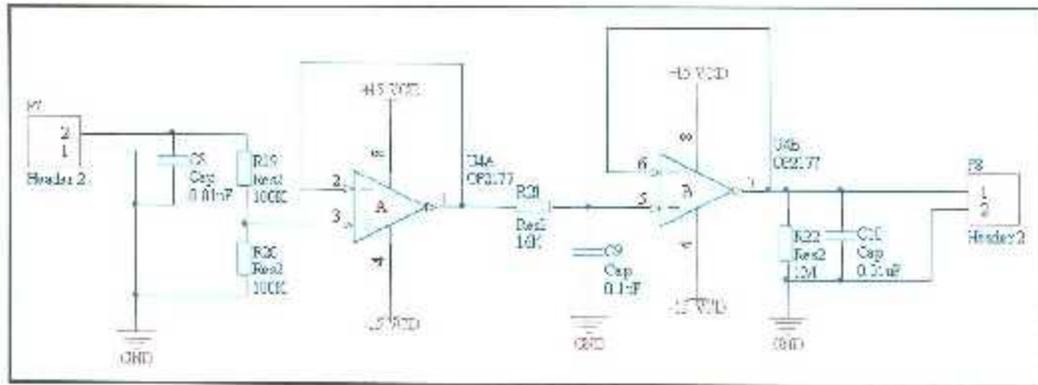


Figura 3.42 Diagrama esquemático del circuito de conversión de señal analógica 0 a 10V a 0-5V.

La figura 3.42 describe el circuito diseñado para acondicionar las señales provenientes de los sensores de proximidad ultrasónicos, cuya salida análoga es de 0 a 10 V. La nomenclatura aplica para ambos diagramas esquemáticos. Para mayor detalle ver anexo XXXI. Se fabrica el circuito impreso que se muestra en la figura 3.43 según como se diseño el circuito virtual.



Figura 3.43 Fabricación de la tarjeta de acondicionamiento de señales.

3.2.1.8.1. Convertidor activo, tridireccional

Para la señal del sensor de presión el cual demanda un poco mas de cuidado en el mapeo de la señalse habilita un convertidor de señales 931H-C2C2D-DC marca Allen Bradley como el mostrado en la figura 3.44.



Figura 3.44 Convertidor activo tridireccional para convertir 4 a 20 mA A 0 -10V.

Su aislamiento es tridireccional, se puede ajustar o calibrar a través de microinterruptor, y presenta baja pérdida de potencia. Su alimentación es de 24 Vcd.

3.2.1.9. Canalización y cableado del sistema de instrumentación.

La tabla 3.4 que se muestra a continuación contiene el desglose de los materiales eléctricos a los que se hace referencia en la tabla 3.3, que son utilizados para la canalización y cableado de todo el sistema de instrumentación, así como los costos calculados a febrero de 2013 de cada uno de los elementos.

MATERIALES DESTILADOR SOLAR					
No.	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo unitario	Total (Pesos MN)
1	CONDJCCN PARED DELGADAAluminio a presión 3/4 L DERFCHA	Pz	2	\$ 28.49	\$ 56.98
2	CODO CONDUIT Curva a 90° liso sin rosca. Pared delgada. Medida 3/4".	Pz	2	\$ 20.00	\$ 40.00
3	CONDUIT HELIXAcero pregalvanizado	Pz	10	\$ 12.66	\$ 126.60

4	CONECTORES HELIX - RECTOS	Pz	10	\$ 7.00	\$ 70.00
5	CONECTORES CON OPRESORES Zinc CCL 3/4	Pz	20	\$ 6.09	\$ 121.80
6	CONECTORES CON OPRESORES Zinc CPD 3/4	Pz	7	\$ 8.40	\$ 58.80
7	PRENSACABLES Nylon CGN 3/4	Pz	8	\$ 32.82	\$ 262.56
8	GABINE METALICO NEMA 4 30x25x15	Pz	1	\$ 461.90	\$ 461.90
9	GABINE METALICO NEMA 4 25x20x15	Pz	1	\$ 349.36	\$ 349.36
10	TUBO CONDUIT Longitud 3 m. Tubo liso sin rosca. Medida 3/4". Sin cople pared delgada.	Pz	4	\$ 70.00	\$ 280.00
11	Cable Viakon 6 hilos 22 AWG	M	50	\$ 15.00	\$ 750.00
12	Tubo Flexible 3/4". Pared delgada	M	10	\$ 20.20	\$ 202.00
TOTAL					\$ 2,780.00

Tabla 3.4. Especificación y costos de los materiales para canalización y cableado del sistema de instrumentación.

Se realizó el cableado para la alimentación y las líneas de señal de los sensores y los actuadores, según como se muestra en los planos de especificación de los Anexos XXVI, XXVII y XVIII del presente documento, de los cuales se extrae el modelo de la figura 3.45. Se utiliza tubería eléctrica tipo conduit para la canalización y protección de las líneas eléctricas.

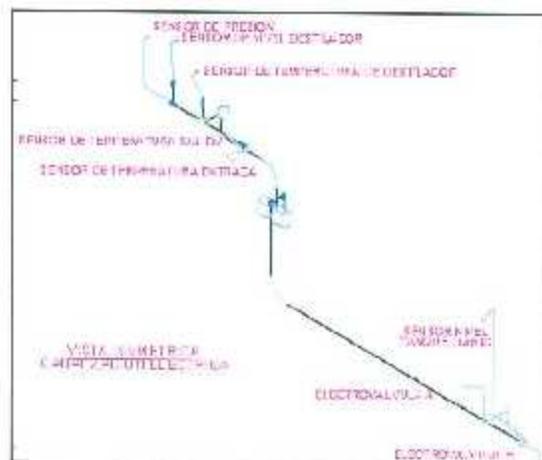


Figura 3.45. Cableado y canalización del sistema de instrumentación.

Se inicia con la instalación de la tubería eléctrica, de los sensores instalados en la estructura del destilador solar ubicada en la azotea del edificio. Se realizó una perforación en la loza del techo para bajar las líneas a los gabinetes de control ubicados en las oficinas de planta baja. La figura 3.46 muestra la etapa de instalación.

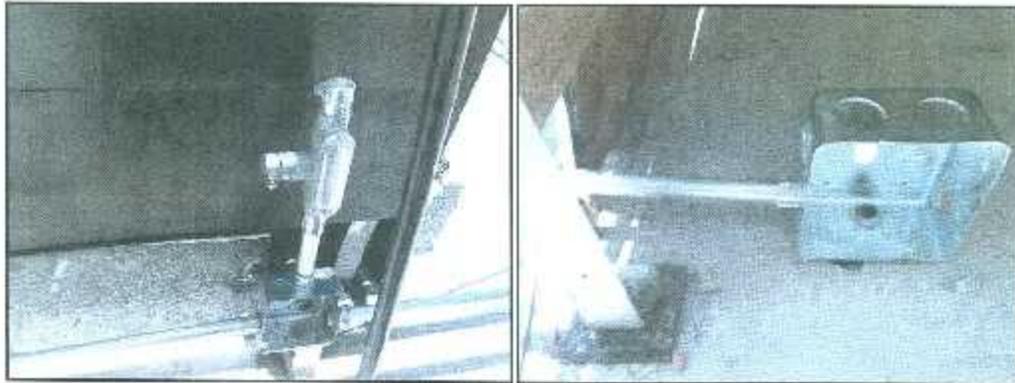


Figura 3.46. Etapa de instalación de tubería eléctrica planta alta.

Se instalan los 2 gabinetes de control, cuya distribución se muestra en el plano del Anexo XXIX, en la oficina del laboratorio de química cuantitativa planta baja, como se muestra en la figura 3.47. Se realizan perforaciones en el muro colindante para pasar el cableado desde el área de los tanques de almacenamiento, donde se encuentran los sensores de nivel y conductividad, además de las válvulas solenoides, hasta los tableros eléctricos.



Figura 3.47. Etapa de instalación de tubería eléctrica y gabinetes de control planta baja.

Las imágenes de la figura 3.48 muestran el ruteo y la canalización final de todo el sistema.

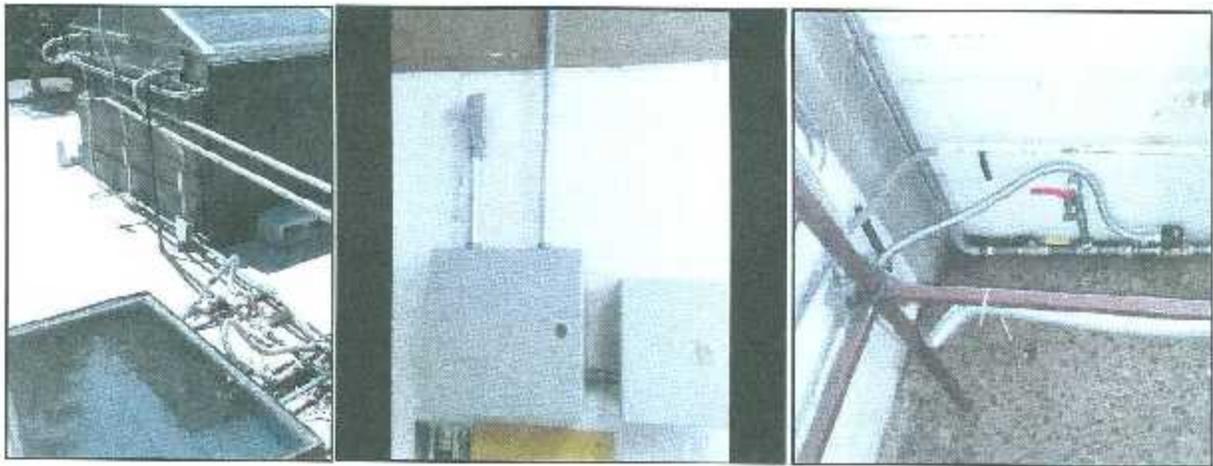
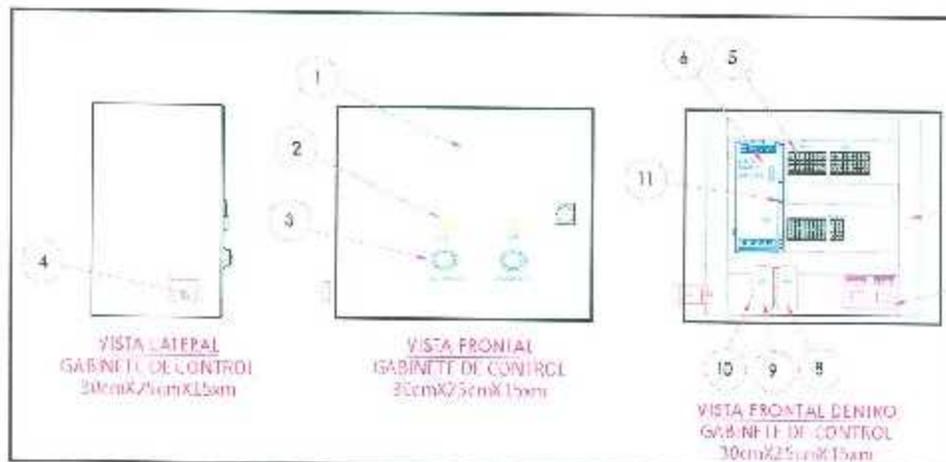


Figura 3.48. Instalación final de tubería y cableado eléctrico.

3.2.1.9.1. Armado de gabinetes

Una vez instaladas las cajas metálicas, se comienza con el armado y montaje de las platinas. La distribución de los gabinetes se muestra en la figura 3.49.



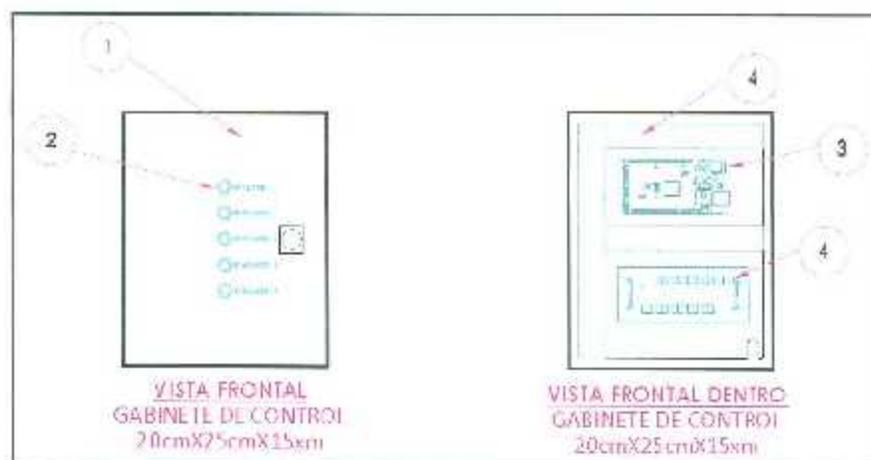


Figura 3.49. Layuot de gabinetes de control del sistema.

Se hacen las perforaciones necesarias en la platina para el montaje de los elementos que indican los planos del anexo XXIX. En la figura 3.50 se observan los gabinetes eléctricos en proceso de ensamble.

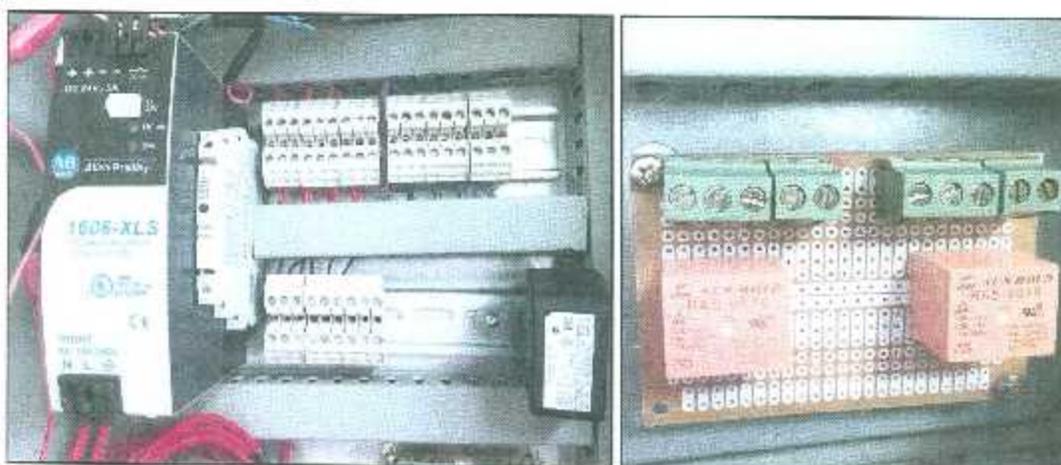


Figura 3.50. Gabinetes de control del sistema de instrumentación en etapa de ensamble.

3.2.2. Software

3.2.2.1. Software Arduino

Para desarrollar y compilar programas para el microprocesador se utiliza el software Arduino.



Figura 3.51. Icono de acceso directo del software Arduino

Arduino Mega viene precargado con un gestor de arranque (bootloader) que permite cargar nuevo código sin necesidad de un programador por hardware externo. Se comunica utilizando el protocolo STK500 original (referencia, archivo de cabecera C).

El software incluye un monitor de puerto serie que permite enviar y recibir información textual de la placa Arduino. Los LEDs RX y TX de la placa parpadearán cuando se detecte comunicación transmitida través del chip FTDI y la conexión USB (no parpadearán si se usa la comunicación serie a través de los pines 0 y 1).

En la figura 3.52 se muestra el entorno de trabajo del software.



Figura 3.52. Entorno de trabajo del software Arduino.

3.2.2.1.1. Programación en Arduino

El software de Arduino utiliza un lenguaje de programación muy parecido al lenguaje C. Permite cargar los sketches con solo apretar un botón del entorno. Dado que el gestor de arranque tiene un lapso de tiempo para ello, la activación del DTR y la carga del sketch se coordinan perfectamente.

3.2.2.1.2. Programación del control del sistema de instrumentación

El programa del controlador Arduino se diseñó para leer las señales provenientes de los sensores conectados a través de los puertos análogos de la tarjeta, procesar la información y posteriormente tomar decisiones de acción sobre los actuadores del sistema (electroválvula de tanque diario, electroválvula de la línea de purga y alarmas visuales). Así como establecer comunicación serial con la computadora a través del puerto USB del microcontrolador para la visualización y almacenamiento de la información a través de la interface LabView.

Para la adquisición de las señales provenientes de los sensores se habilitaron los puertos de entradas como se muestra en la tabla 3.5.

Se especifican las salidas utilizadas para enviar la señal a los actuadores:

Sensor	Entrada/puerto
Sensor de Nivel Tanque Diario	Entrada análoga A0
Sensor de Nivel Charola	Entrada análoga A1
Sensor de Temperatura Charola	Entrada análoga A2
Sensor de Temperatura Entrada Colector Solar	Entrada análoga A3
Sensor de Temperatura Salida Colector Solar	Entrada análoga A4
Sensor de Presión	Entrada análoga A8
Sensor de Conductividad Tanque Diario	Entrada análoga A9
Sensor de Conductividad Charola	Entrada análoga A10
Electroválvula de tanque diario	Salida digital 0
Electroválvula de línea de purga	Salida digital 1
Luz indicadora de alta conductividad en tanque diario	Salida digital 7
Luz indicadora de alto nivel en tanque diario	Salida digital 8
Luz indicadora de alto nivel en charola	Salida digital 9
Luz indicadora de bajo nivel en charola	Salida digital 10
Luz indicadora de presión fuera de rango	Salida digital 11

Tabla 3.5. Configuración de entradas para sensores y salidas para actuadores en la tarjeta Arduino Mega 2560.

El programa se encuentra dentro de un ciclo while infinito que le permite procesar continuamente la información, y ejecutar las acciones necesarias, así como sondear continuamente el canal de la comunicación serial en espera de algún dato proveniente de la computadora que le indique iniciar algún proceso de adquisición de datos de los puertos arriba mencionados y su respuesta con el dato adquirido enviado de regreso a través del mismo puerto.

El código se desarrolló en tres etapas para su correcto funcionamiento: la primera de ellas es la parte del código para el control automático del proceso, en donde se captura la información de las entradas y se hacen las adecuaciones de los datos de acuerdo a los rangos que maneja cada uno de los sensores utilizados. De esta manera se procesan estos datos y se definen los límites permitidos para cada variable, y se generan las salidas por los puertos digitales

conectados a los actuadores (electroválvula de tanque diario y luces indicadoras). La segunda etapa es la implementación del algoritmo de control por lógica difusa para el control de la electroválvula de la línea de purga. Y una tercera etapa del programa donde se configura la comunicación serial del Arduino con la interface grafica de monitoreo y manipulación de las variables del proceso.

3.2.2.1.3. Programación de la comunicación serial con la interface de monitoreo de variables en LabView

El siguiente código se carga en el programa principal del Arduino para poder establecer la comunicación con el software de monitoreo LabView.

```

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  pinMode(Indicador, OUTPUT);
}

void loop()
{
  while(1)
  {
    if(Serial.available() > 0)
    {
      inSerial = Serial.read();

      if(inSerial == '0')
      {
        AnalogData=analogRead(0);
        adecuarDatoNivel1(AnalogData);
        Serial.print(AnalogData);
      }
      if(inSerial == '1')
      {
        AnalogData=analogRead(1);
        adecuarDatoNivel2(AnalogData);
        Serial.print(AnalogData);
      }
      if(inSerial == '2')
      {
        AnalogData=analogRead(2);
        adecuarDatoTemp(AnalogData);
        Serial.print(AnalogData);
      }
    }
  }
}

```

```

if(inSerial == '3')
{
AnalogData=analogRead(3);
adecuarDatoTemp(AnalogData);
Serial.print(AnalogData);
}
if(inSerial == '4')
{
AnalogData=analogRead(4);
adecuarDatoTemp(AnalogData);
Serial.print(AnalogData);
}
if(inSerial == '5')
{
AnalogData=analogRead(8);
adecuarDatoCond(AnalogData);
Serial.print(AnalogData);
}
if(inSerial == '6')
{
AnalogData=analogRead(9);
adecuarDatoCond(AnalogData);
Serial.print(AnalogData);
}
if(inSerial == '7')
{
AnalogData=analogRead(10);
adecuarDatoPres(AnalogData);
Serial.print(AnalogData);
}
if(inSerial == '8')
{
digitalWrite(Indicador, HIGH);
}
if(inSerial == '9')
{
digitalWrite(Indicador, LOW);
}
}
}

void adecuarDato(int dato)
{
if(dato < 10)
Serial.print("000");
else if((dato >= 10) && (dato < 100))
Serial.print("00");
else if((dato >= 100) && (dato < 1000))
Serial.print("0");
}
}

```

3.2.2.1.4. Desarrollo del algoritmo de lógica difusa para control de purga

Se controló automáticamente con lógica difusa, el proceso de purga de la charola del destilador solar de alto rendimiento. Se define solo utilizar este algoritmo para la etapa de purga ya que el resto de los sensores requieren solo su registro. Se realiza través del actuador válvula solenoide de la línea de purga y en función de las variables de nivel y conductividad en la charola del destilador y nivel de agua destilada en tanque diario (Producción), utilizándose las funciones propias del software Arduino.

Primero se generan las gráficas de las funciones de pertinencia como se muestran a continuación:

Función de pertenencia de Nivel De Agua en Charola de Destilador						
Voltaje (V)	Distancia Equivalente (mm)	Binario	Grupo de pertenencia			
			Nivel Bajo	Nivel Medio	Nivel Alto	
2.5	350	512	1	0	0	
2.4	340	492	1	0	0	
2.3	330	471	1	0	0	
2.2	320	451	1	0	0	
2.1	310	430	1	0	0	
2.0	300	410	1	0	0	
1.9	290	389	1	0	0	
1.8	280	369	1	0	0	
1.7	270	348	1	0	0	
1.6	260	328	1	0	0	
1.5	250	307	0.75	0.25	0	
1.4	240	287	0.50	0.50	0	
1.3	230	266	0.25	0.75	0	
1.2	220	246	0	1	0	
1.1	210	225	0	1	0	
1.0	200	205	0	1	0	

0.9		190	184	0	1	0
0.8		180	164	0	1	0
0.7		170	143	0	1	0
0.6		160	123	0	0.75	0.25
0.5		150	102	0	0.50	0.50
0.4	Posición del sensor	140	82	0	0.25	0.75
0.3		130	61	0	0	1
0.2		120	41	0	0	1
0.1		110	20	0	0	1
0.0		100	0	0	0	1

Tabla 3.6. Función de pertenencia del nivel de agua en charola

NIVEL DE AGUA EN CHAROLA

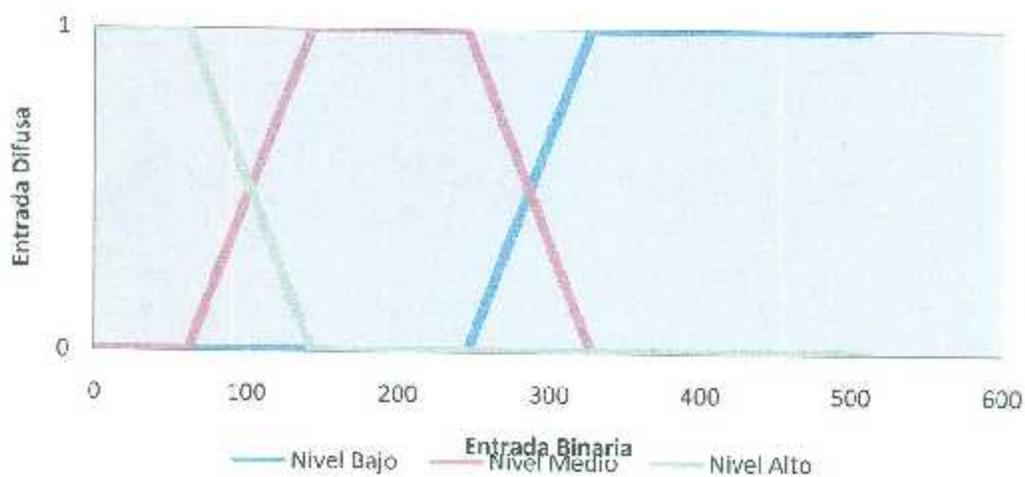


Figura 3.53. Gráfica de la función de pertenencia de la variable nivel de agua en charola

Función de pertenencia de Conductividad				
Voltaje	Binario	Grupo de pertenencia		
		Baja	Media	Alta
0	0	1	0	0
0.1	9	1	0	0
0.2	17	1	0	0
0.3	26	1	0	0
0.4	34	1	0	0
0.5	43	1	0	0
0.6	51	1	0	0
0.7	60	1	0	0
0.8	68	0.5	0.5	0.0
0.9	77	0	1	0
1	85	0	1	0
1.1	94	0	1	0
1.2	102	0	1	0
1.3	111	0	1	0
1.4	119	0	1	0
1.5	128	0	1	0
1.6	136	0	1	0
1.7	145	0	1	0
1.8	153	0	1	0
1.9	162	0	0.5	0.5
2	170	0	0	1
2.1	179	0	0	1
2.2	187	0	0	1
2.3	196	0	0	1
2.4	204	0	0	1
2.5	213	0	0	1
2.6	221	0	0	1
2.7	230	0	0	1
2.8	238	0	0	1
2.9	247	0	0	1
3	255	0	0	1

Tabla 3.7. Función de pertenencia de conductividad eléctrica del agua en charola



Figura 3.53. Gráfica de la función de pertenencia de conductividad eléctrica del agua en charola.

Función de pertenencia de Nivel de Agua Destilada					
Voltaje (V)	Distancia Equivalente (mm)	Binario	Grupo de pertenencia		
			Nivel Bajo	Nivel Medio	Nivel Alto
3.7	1162	758	1	0	0
3.6	1136	737	1	0	0
3.5	1110	717	1	0	0
3.4	1084	696	1	0	0
3.3	1058	676	1	0	0
3.2	1032	655	1	0	0
3.1	1006	635	1	0	0
3.0	980	614	1	0	0
2.9	954	594	1	0	0
2.8	928	573	1	0	0
2.7	902	553	1	0	0
2.6	876	532	0.75	0.25	0
2.5	850	512	0.50	0.50	0
2.4	824	492	0.25	0.75	0
2.3	798	471	0	1	0
2.2	772	451	0	1	0
2.1	746	430	0	1	0
2.0	720	410	0	1	0
1.9	694	389	0	1	0
1.8	668	369	0	1	0
1.7	642	348	0	1	0
1.6	616	328	0	1	0
1.5	590	307	0	0.75	0.25
1.4	564	287	0	0.50	0.50
1.3	538	266	0	0.25	0.75
1.2	512	246	0	0	1
1.1	486	225	0	0	1
1.0	460	205	0	0	1
0.9	434	184	0	0	1
0.8	408	164	0	0	1
0.7	382	143	0	0	1
0.6	356	123	0	0	1
0.5	330	102	0	0	1
0.4	304	82	0	0	1
0.3	278	61	0	0	1

0.2	252	41	0	0	1
0.1	226	20	0	0	1
0.0	200	0	0	0	1

Tabla 3.8. Función de pertenencia de nivel de agua destilada en tanque de almacenamiento diario.



Figura 3.54. Gráfica de la función de pertenencia de la variable nivel de agua destilada en tanque diario.

Posteriormente se establecen las reglas de inferencia.

REGLAS DE INFERENCIA					
ENTRADA 1		ENTRADA 2		ENTRADA 3	SALIDA
NIVEL AGUA CHAROLA		CONDUCTIVIDAD		NIVEL AGUA DESTILADA	PORCENTAJE DE PURGA
BAJO	AND	BAJA	AND	BAJO	MEDIO
BAJO	AND	BAJA	AND	MEDIO	MEDIO
BAJO	AND	BAJA	AND	ALTO	MEDIO
BAJO	AND	MEDIA	AND	BAJO	ALTO
BAJO	AND	MEDIA	AND	MEDIO	ALTO
BAJO	AND	MEDIA	AND	ALTO	ALTO
BAJO	AND	ALTA	AND	BAJO	ALTO
BAJO	AND	ALTA	AND	MEDIO	ALTO
BAJO	AND	ALTA	AND	ALTO	ALTO
MEDIO	AND	BAJA	AND	BAJO	BAJO
MEDIO	AND	BAJA	AND	MEDIO	BAJO
MEDIO	AND	BAJA	AND	ALTO	MEDIO
MEDIO	AND	MEDIA	AND	BAJO	MEDIO
MEDIO	AND	MEDIA	AND	MEDIO	MEDIO
MEDIO	AND	MEDIA	AND	ALTO	MEDIO
MEDIO	AND	ALTA	AND	BAJO	ALTO
MEDIO	AND	ALTA	AND	MEDIO	ALTO
MEDIO	AND	ALTA	AND	ALTO	ALTO
ALTO	AND	BAJA	AND	BAJO	BAJO
ALTO	AND	BAJA	AND	MEDIO	BAJO
ALTO	AND	BAJA	AND	ALTO	MEDIO
ALTO	AND	MEDIA	AND	BAJO	MEDIO
ALTO	AND	MEDIA	AND	MEDIO	MEDIO
ALTO	AND	MEDIA	AND	ALTO	MEDIO
ALTO	AND	ALTA	AND	BAJO	ALTA
ALTO	AND	ALTA	AND	MEDIO	ALTA
ALTO	AND	ALTA	AND	ALTO	ALTA

Tabla 3.9. Reglas de inferencia.

Analizando estas 27 reglas se pueden resumir en 3 expresiones, una por cada grupo difuso de la salida (Porcentaje de Purga), quedando como sigue:

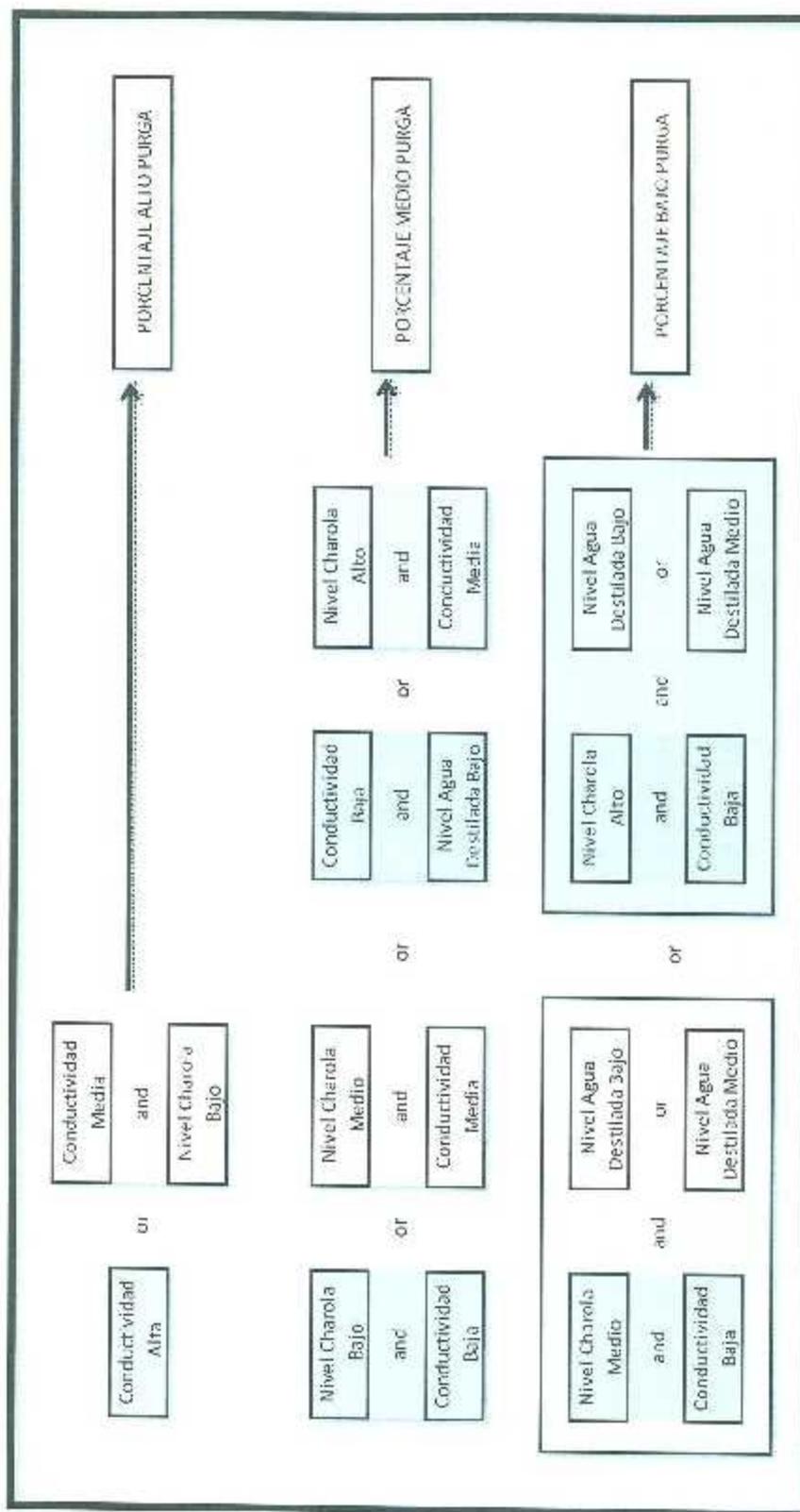


Figura 3.55. Grafica de las expresiones que resumen las reglas de inferencia

Finalmente se define la gráfica de Defusificación de la salida

TABLA PARA DEFUSIFICAR LA SALIDA			
Porcentaje de Purga (%)	Grupo de pertenencia		
	Bajo	Medio	Alto
0%	1	0	0
5%	1	0	0
10%	1	0	0
15%	1	0	0
20%	1	0	0
25%	1	0	0
30%	1	0	0
35%	0.5	0.5	0
40%	0	1	0
45%	0	1	0
50%	0	1	0
55%	0	1	0
60%	0	1	0
65%	0	0.5	0.5
70%	0	0	1
75%	0	0	1
80%	0	0	1
85%	0	0	1
90%	0	0	1
95%	0	0	1
100%	0	0	1

Tabla 3.10. Tabla de la defusificación de la salida

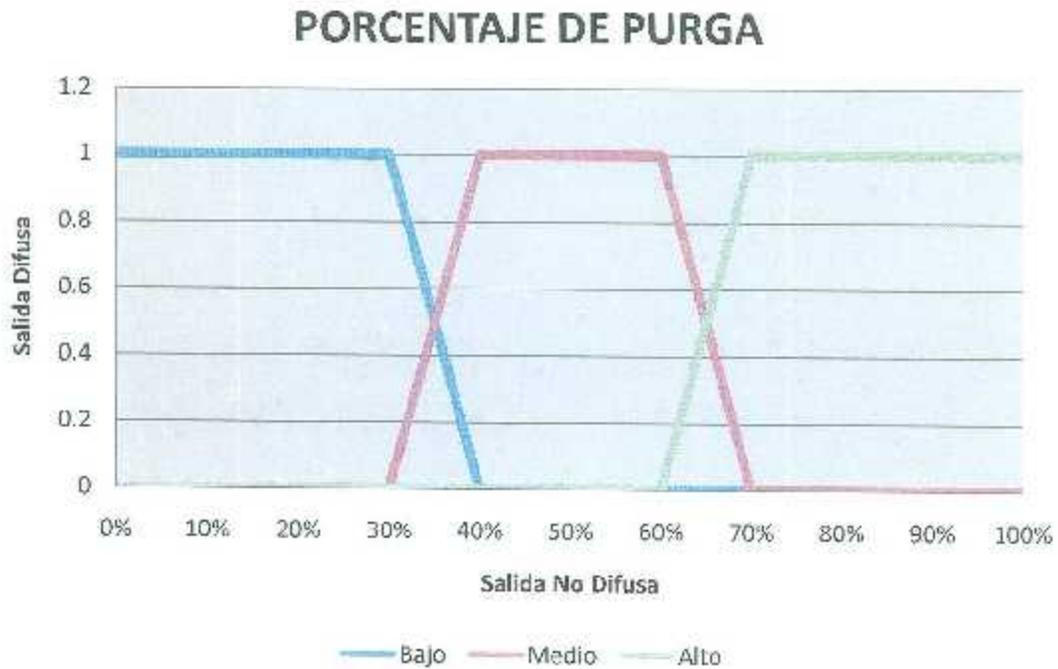


Figura 3.56. Gráfica de defusificación de la salida.

Finalmente el código del programa queda como se muestra a continuación:

```
{
//Declaración de variables

int ent_ce, ent_dest, ent_ch;
float ce_baja, ce_medio, ce_alto;
float mce1, mce2;
int lim1_ceb, lim2_ceb, lim1_cem, lim2_cem, lim1_cea, lim2_cea;
int lim1_destb, lim2_destb, lim1_destm, lim2_destm, lim1_desta, lim2_desta;
int lim1_chb, lim2_chb, lim1_chm, lim2_chm, lim1_cha, lim2_cha;
float mdest1, mdest2;
float dest_bajo, dest_medio, dest_alto;
float mch1, mch2;
float ch_bajo, ch_medio, ch_alto;
int cont;
float purga_alto, purga_medio, purga_bajo;
float aux_medio1, aux_medio2, aux_medio3, aux_medio4, aux_baja1, aux_baja2, aux_baja3;
float x_baja, x_medio, x_alto;
float areabaja, areamedio, areaalto;
float Xcen;
char ce[3], dest[3], ch[4];

//Configuración de puertos

WrPortI(SPCK, &SPCKShadow, 0x80);
WrPortI(PFFR, &PFFRShadow, 0x00);
WrPortI(PEDDR, &PEDDRShadow, 0x00);

//Establecimiento de límites para los grupos de pertenencia de Conductividad
lim1_ceb=0;
lim2_ceb=77;
lim1_cem=60;
lim2_cem=170;
lim1_cea=153;
lim2_cea=255;

//Establecimiento de límites para los grupos de pertenencia de Nivel de Agua Destilada
lim1_destb=255;
lim2_destb=29;
lim1_destm=33;
lim2_destm=18;
lim1_desta=22;
lim2_desta=0;

//Establecimiento de límites para los grupos de pertenencia de Nivel en la Charola
lim1_chb=2000;
lim2_chb=800;
lim1_chm=900;
lim2_chm=400;
lim1_cha=500;
lim2_cha=0;
}
```

```

constate{

//ASIGNACION DE VALORES SOLO PARA PRUEBAS

printf("Conductividad(0 a 255): ");
    gets(ce);
ent_ce=atoi(ce);
printf("Entrada Conductividad: %d.\n",ent_ce);
printf("Nivel Agua Destilada(255 a 0): ");
    gets(dest);
ent_dest=atoi(dest);
printf("Entrada Dest: %d.\n",ent_dest);
printf("Nivel Agua Charola (2000 a 0): ");
    gets(ch);
ent_ch=atoi(ch);
printf("Entrada Charola: %d.\n\n",ent_ch);

//Lectura de puentes

ent_ce=RdPort(PADR); //puort A conductividad 8bits
printf("Entrada Conductividad: %d",ent_ce);
    waitfor (DelaySec(3));
ent_dest=RdPort(PBDR); //Nivel agua destilada 6 bits menos significativos
ent_dest= ent_dest& 0x3F;
printf("NivelDest: %d",ent_dest);
    waitfor (DelaySec(3));

//Calculo de pendientes CONDUCTIVIDAD

mce1=0.05882352941176470588235294117647;
mce2=0.05882352941176470588235294117647;
//Calculo de pendientes NIVEL DE AGUA DESTILADA
mdest1= 0.25;
mdest2= -0.25;
//Calculo de pendientes NIVEL DE AGUA EN CHAROLA
mch1= 0.01;
mch2= -0.01;

//Funciones de niveles de pertenencia a grupos CONDUCTIVIDAD BAJA, MEDIA, ALTA
if (ent_ce<lim1_cem){
    ce_baja=1;
ce_media=0;
ce_alta=0;}
if ((ent_ce>=lim1_cem) && (ent_ce<=lim2_cem)){
ce_baja= mce1*(ent_ce - lim2_cem);
ce_media= mce2*(ent_ce - lim1_cem);
ce_alta=0;}
if ((ent_ce>lim2_cem) && (ent_ce<lim1_cea)){
ce_baja=0;
ce_media=1;
ce_alta=2;}
if ((ent_ce>=lim1_cea) && (ent_ce<=lim2_cem)){
ce_baja=0;

```

```

ce_media= mce1*(ent_ce - lim2_cem);
ce_alta=mos2*(ent_ce - lim1_cea);}
if (ent_ce>lim2_cem){
ce_baja=0;
ce_media=0;
ce_alta=1;}
printf("-----PERTENENCIA CONDUCTIVIDAD-----\n");
printf("Conductividad baja: %.2f \n",ce_baja);
printf("Conductividad media: %.2f \n",ce_media);
printf("Conductividad alta: %.2f.\n\n",ce_alta);

//Funciones de niveles de pertenencia a grupos NIVEL AGUA DESTILADA BAJO, MEDIO, ALTO
if (ent_dest>= 0x20,
{
dest_alto=0;
dest_medio=0;
dest_bajo=1;}
else{ if ((ent_dest<33)&&(ent_dest>29)){
dest_alto=0;
dest_medio= mdest2*(ent_dest - lim1_destm);
dest_bajo=mdest1*(ent_dest - lim2_destb);}
else{ if ((ent_dest<=29)&&(ent_dest>=22)){
dest_alto=0;
dest_medio=1;
dest_bajo=0;}
else { if ((ent_dest<22)&&(ent_dest>18)){
dest_alto= mdest2*(ent_dest - lim1_destu);
dest_medio=mdest1*(ent_dest - lim2_destm);
dest_bajo=0;}
else{ dest_alto=1;
dest_medio=0;
dest_bajo=0;}
}
}
}

printf("-----PERTENENCIA NIVEL AGUA DESTILADA-----\n");
printf("Nivel bajo agua destilada: %.2f.\n",dest_bajo);
printf("Nivel medio agua destilada: %.2f.\n",dest_medio);
printf("Nivel alto agua destilada: %.2f.\n\n",dest_alto);

//Lectura y procesamiento de la señal NIVEL AGUA CHAROLA
cont=0;
BitWrPortI(PBDR, &PBDRShadow, 1, 7);
waitfor (DelayMs(10));
BitWrPortI(PBDR, &PBDRShadow, 0, 7);
ent_ch= BitRdPortI(PEDR, 1);
while (ent_ch){
cont=cont+1;
ent_ch= BitRdPortI(PEDR, 1);}
printf("Nivelcharola: %d",cont);
waitfor (DelaySec(1));

```

```

//Funciones de niveles de pertenencia a grupos NIVEL AGUA CHAROLA BAJO, MEDIO, ALTO
    if (ent_ch<400){
        ch_alto=1;
    }
    ch_medio=0;
    ch_bajo=0;
    if ((ent_ch>=400) && (ent_ch<=500)){
        ch_alto=mch2*(ent_ch - lim1_cha);
        ch_medio=mch1*(ent_ch - lim2_chm);
        ch_bajo=0;
    }
    if ((ent_ch>500) && (ent_ch<800)){
        ch_alto=0;
        ch_medio=1;
        ch_bajo=0;
    }
    if ((ent_ch>=800) && (ent_ch<=900)){
        ch_alto=0;
        ch_medio=mch2*(ent_ch - lim1_chm);
        ch_bajo=mch1*(ent_ch - lim2_chb);
    }
    if (ent_ch>900){
        ch_alto=0;
        ch_medio=0;
        ch_bajo=1;
    }
    printf("-----PERTENENCIA NIVEL EN CHAROLA-----\n");
    printf("Nivel bajo charola: %.2f.\n",ch_bajo);
    printf("Nivel medio charola: %.2f.\n",ch_medio);
    printf("Nivel alto charola: %.2f.\n",ch_alto);

//Reglas de Fusificación

//REGLA 1
if (ce_medio>ch_bajo){
    purga_alta=ch_bajo;
} else{
    purga_alta=ce_medio;}

if (purga_alta<ce_alta){
    purga_alta=ce_alta;}

//REGLA 2
//condiciones "AND"
if (ch_bajo<=ce_baja){
    aux_medio1=ch_bajo;}
else {
    aux_medio1=ce_baja;}
if (ch_medio<=ce_medio){
    aux_medio2=ch_medio;}
else {
    aux_medio2=ce_medio;}
if (ce_baja<=dest_alto){
    aux_medio3=ce_baja;}
else {
    aux_medio3=dest_alto;}
if (ch_alto<=ce_medio){
    aux_medio4=ch_alto;}

```

```

else {
    aux_media4=ce_medio;}

//condiciones "OR"
if (aux_media1>=aux_media2){
    if (aux_media1>=aux_media3){
        if (aux_media1>=aux_media4){
            purga_media=aux_media1;}
        else{
            purga_media=aux_media4;}}
    else{
        purga_media=aux_media3;}}
    else{
        purga_media=aux_media2;}

//REGLA 3

    if (dest_bajo>=dest_medio){
        aux_baja1=dest_bajo;}
    else{
        aux_baja1=dest_medio;}

if (ch_medio<=ce_baja){
    if (ch_medio<=aux_baja1){
        aux_baja2=ch_medio;}
    else {
        aux_baja2=aux_baja1;}}
    else {
        aux_baja2=ce_baja;}

if (ch_alto<=ce_baja){
    if (ch_alto<=aux_baja1){
        aux_baja3=ch_alto;}
    else {
        aux_baja3=aux_baja1;}}
    else {
        aux_baja3=ce_baja;}

//condiciones "OR"
if (aux_baja2>=aux_baja3){
    purga_baja=aux_baja2;}
    else{
        purga_baja=aux_baja3;}

printf("-----SALIDAS DIFUSA-----\n");
printf("Salida Baja Purga: %.2f.\n",purga_baja);
printf("Salida Media Purga: %.2f.\n",purga_media);
printf("Salida Alta Purga: %.2f.\n\n",purga_alta);

//DEFUSIFICACION de la salida (CALCULO DEL CENTRIDE)

//Calculo de áreas
if (purga_baja<=purga_media){
    areabaja=30*purga_baja;

```

```

xbaja=15;
if (purga_media<=purga_alta){
areamedia=30*purga_media;
xmedia=45;
areaalta=40*purga_alta;
xalta=80;}
else{
areamedia=40*purga_media;
xmedia=50;
areaalta=30*purga_alta;
xalta=85;}}
else{
    areabaja=40*purga_baja;
xbaja=20;
if (purga_media<=purga_alta){
areamedia=20*purga_media;
xmedia=30;
areaalta=40*purga_alta;
xalta=80;}
else{
areamedia=30*purga_media;
xmedia=35;
areaalta=30*purga_alta;
xalta=85;}}

printf("-----AREAS-----\n");
printf("Area Baja: %.2f.\n",areabaja);
printf("Area Media: %.2f. \n",areamedia);
printf("Area Alta: %.2f. \n\n", areaalta);

//X° testada del centroide
Xcen=(1 / (areabaja+areamedia+areaalta))*({xbaja*areabaja} + {xmedia*areamedia} +
{xalta*areaalta});

printf("-----SALIDA NO DIFUSA-----\n\n");
printf("Debe purgarse el %.2f por ciento del agua en la charola \n",Xcen);

}
}

```

3.2.2.2. Software LabVIEW 2012

LabVIEW es un software de diseño de sistemas que proporciona a ingenieros y científicos las herramientas que necesitan para crear y desplegar sistemas de medidas y control.

El software LabVIEW es ideal para cualquier sistema control y monitoreo de variables. Cuenta con herramientas para construir una amplia variedad de aplicaciones en poco tiempo.

LabVIEW es una plataforma de programación gráfica que ayuda a escalar desde el diseño hasta pruebas y desde sistemas pequeños hasta grandes sistemas. Ofrece integración sin precedentes con software legado existente, IP y hardware al aprovechar las últimas tecnologías de cómputo

NI LabVIEW ofrece una incomparable integración con hardware de adquisición de datos de NI y de terceros, bibliotecas de procesamiento de señales y controles de interfaz de usuario construidos con propósitos específicos para visualización de datos de medidas.



Figura 3.57. Entorno LabView para la creación de un nuevo proyecto.

La interface de monitoreo se creó en este software utilizando controles de clic-y-arrastre, gráficas y herramientas de visualización. Se diseñó para la adquisición de los datos desde la tarjeta Arduino. Se incorporaron imágenes y se modificaron los controles predeterminados para proporcionar un apariencia propia del proyecto. Primero se genera el proyecto principal como lo muestra la figura 3.57.

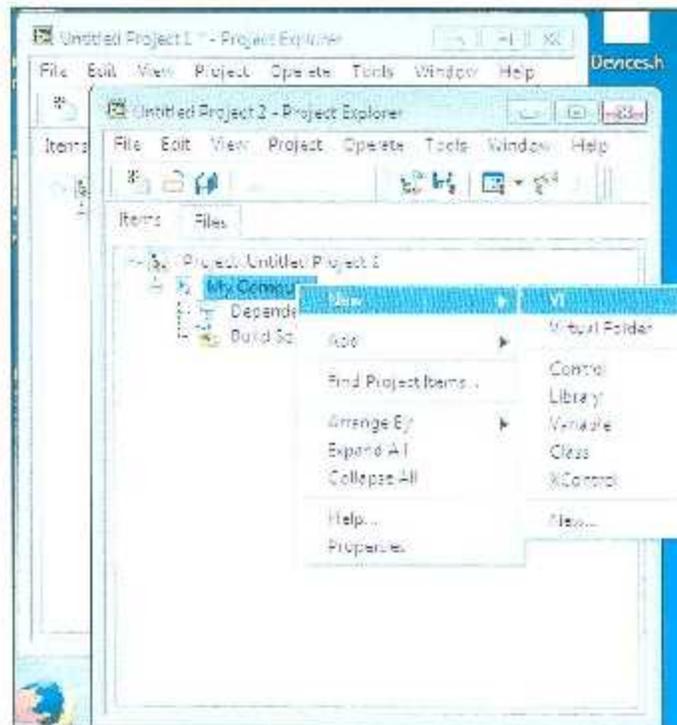


Figura 3.58. Agregar un nuevo VI al proyecto existente.

Posteriormente agregamos el VI que es el archivo de la aplicación específica, que permite diseñar el aspecto gráfico de la interface de usuario y además programar las acciones necesarias. La figura 3.58 muestra como agregar un VI al árbol del proyecto principal. En la siguiente sección se describe la aplicación generada para el monitoreo de las variables del proceso.

3.2.2.2.1. Interface de control y monitoreo

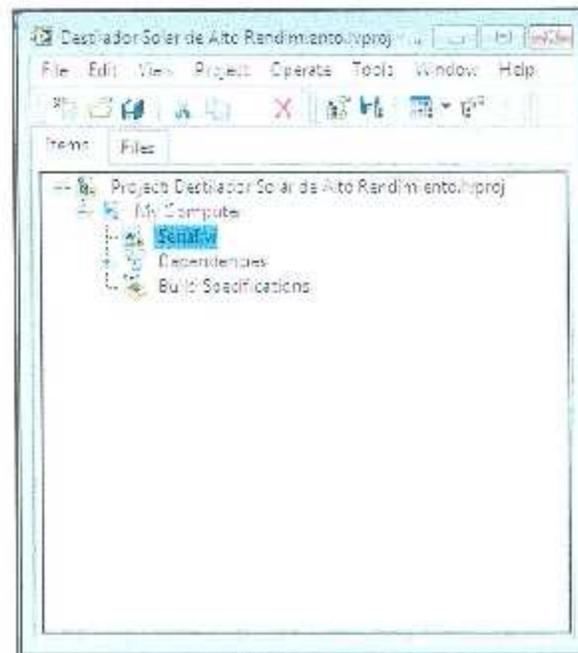


Figura 3.59. Visualización del árbol del proyecto generado para la interface de monitoreo de las variables del proceso del destilador solar de alto rendimiento

El entorno de trabajo de cada VI en LabView consta de dos ventanas, el "Panel Frontal", que es el espacio donde se diseña la pantalla de usuario, y la ventana de "Diagrama de bloques", donde se programan de manera grafica las acciones de cada elemento del panel frontal.

La figura 3.60 muestra una parte del panel frontal diseñado para la aplicación, donde se puede observar los indicadores numéricos que se agregaron para el despliegue en pantalla de los valores de las variables.

También se muestran los indicadores booleanos (leds) para las alarmas visuales para notificar al usuario cuando los valores de cada variable salen del rango especificado. Estos indicadores son los mismos que se encuentran en el gabinete de control instalado en las oficinas de los laboratorios. De esta manera el usuario tiene la posibilidad de notar alguna anomalía en el proceso desde ambos indicadores.

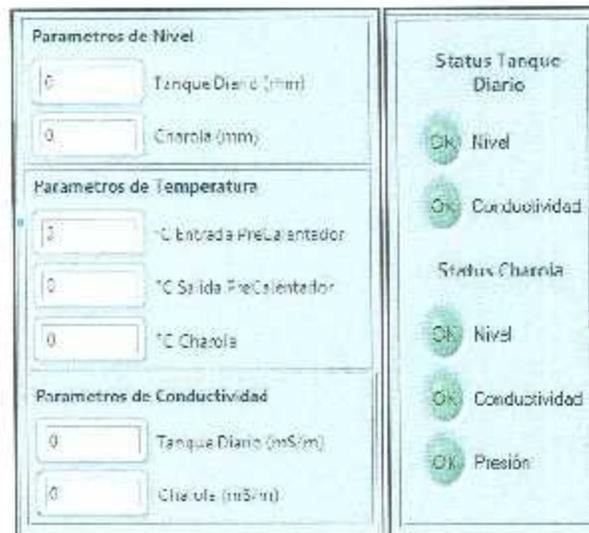


Figura 3.60. Indicadores numéricos agregados en el panel frontal de la interfaz de monitoreo.

El código para el funcionamiento de esta interface se puede observar en las siguientes imágenes. La figura 3.61 muestra el código generado para establecer la comunicación serial con software Arduino:

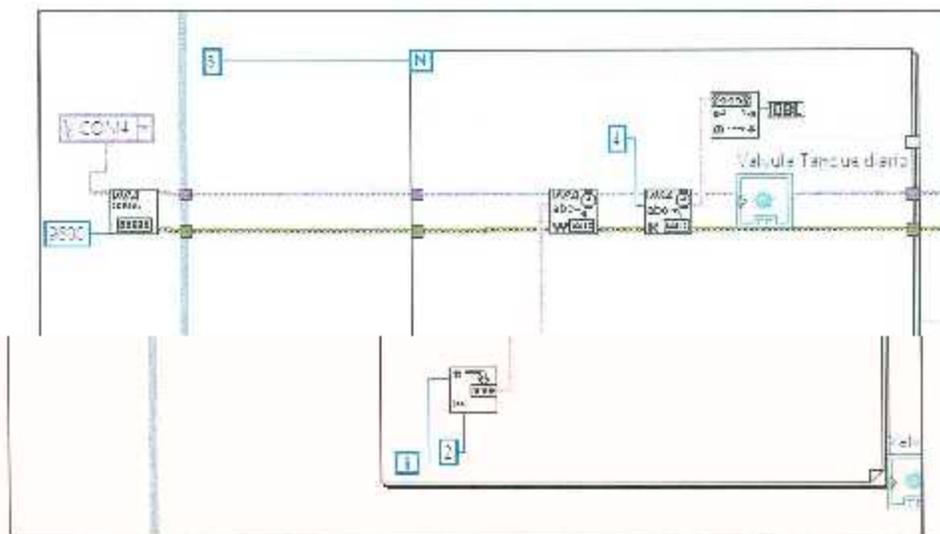


Figura 3.61. Parte del código en el Diagrama de Bloques para la comunicación serial.

Posteriormente se genera un ciclo que permite enviar un comando de inicio para la recepción de cada una de las mediciones de los sensores, figura 3.62.

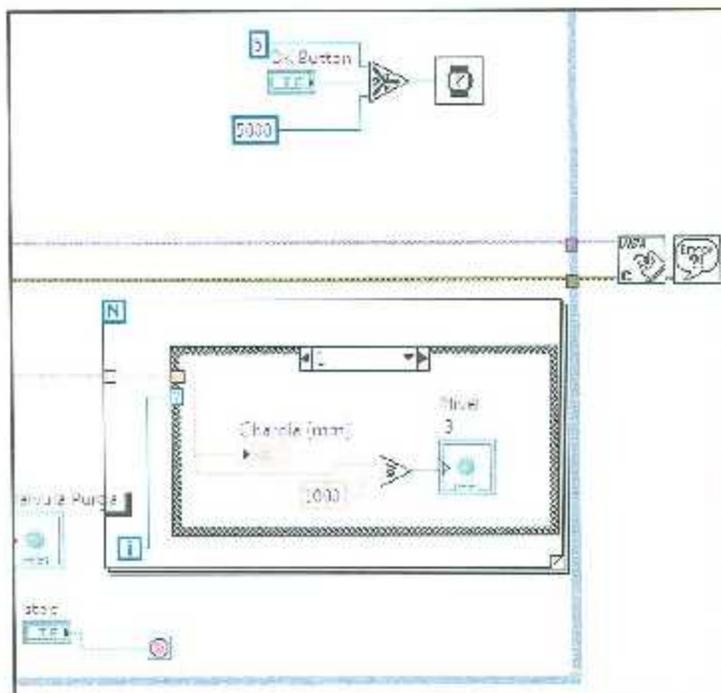


Figura 3.62. Secuencia de inicio para la recepción de los datos desde Arduino.

Así se van capturando cada una de las señales enviadas por medio del puerto serial. La figura 3.63 presenta el código generado para cada una de las variables.

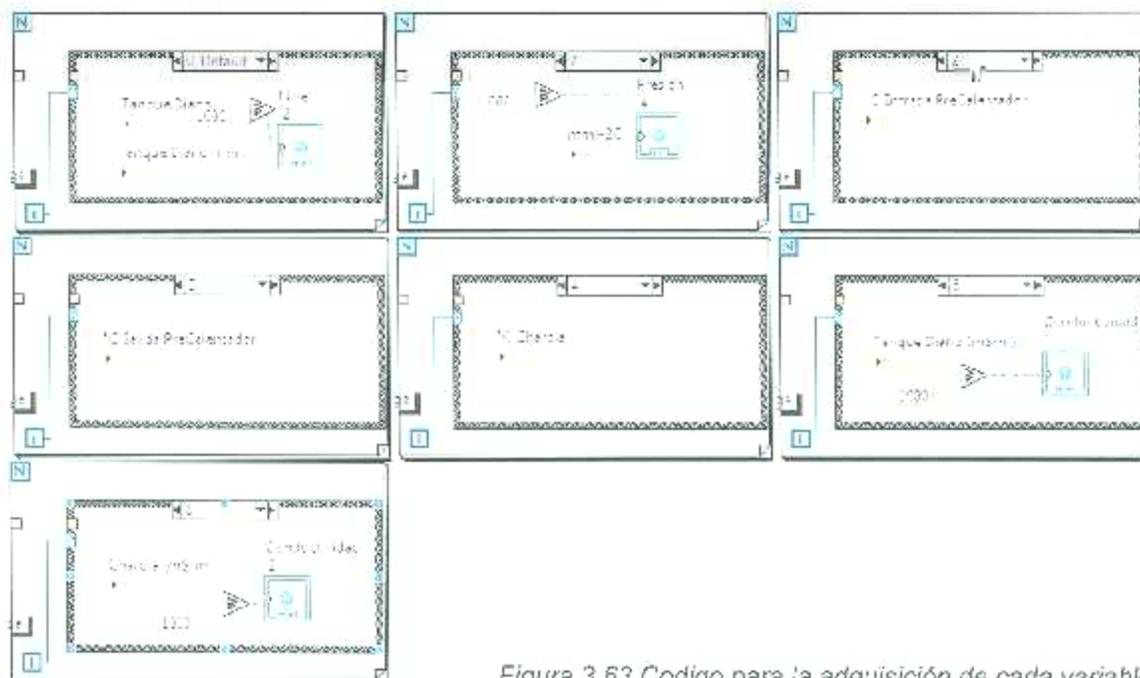


Figura 3.63. Código para la adquisición de cada variable.

3.2.2.2. Manipulación de variables

La interface de usuario incluye también una sección para la manipulación de los actuadores de manera independiente al programa principal de control. Esto para preveer los trabajos de mantenimiento del sistema y permitir la operación manual de las electroválvulas.

Para ello se agregan dos controles booleanos mostrados en la figura 3.64, los cuales controlaran la actuación de las electroválvulas.



Figura 3.64. Controles booleanos para la operación manual de las electroválvulas.

El código para el funcionamiento de esta sección se puede observar en la figura 3.65. Las señales de los controles son enviadas por el puerto serie hacia el controlador Arduino:

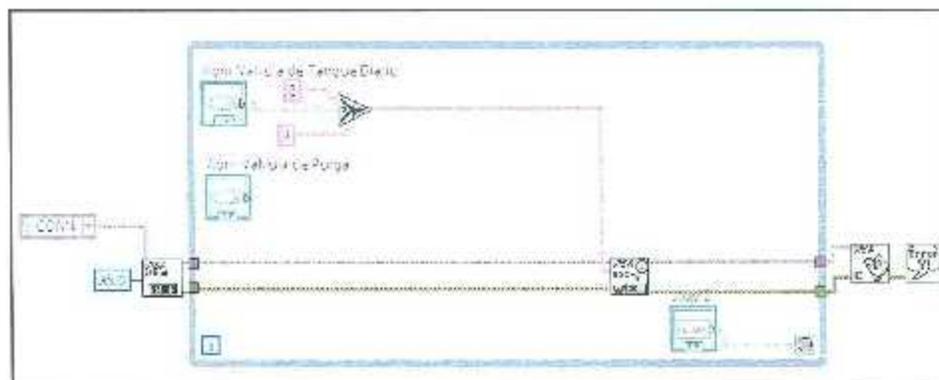


Figura 3.65. Código para la operación manual de las electroválvulas.

Capítulo 4. Resultados

4.1. Fabricación de un destilador solar de alto rendimiento

El modelo de destilador solar construido es el de dos vertientes, con un ángulo de inclinación del sistema de condensación (vidrio) de 30° . La estructura del destilador solar de alto rendimiento se instaló en la azotea del edificio 12 del Instituto Tecnológico de la Laguna, en la sección Suroeste de la loza del techo de los laboratorios de Química Cuantitativa. La tubería de agua destilada y la línea de purga del sistema bajan hacia los tanques de almacenamientos ubicados en la planta del edificio, dentro de los laboratorios. Los tableros de control se instalaron dentro de las oficinas del laboratorio, donde se encuentra la computadora.

La figura 4.1 muestra el sistema completo del destilador solar de alto rendimiento con el colector solar de la etapa de precalentamiento de agua de alimentación.

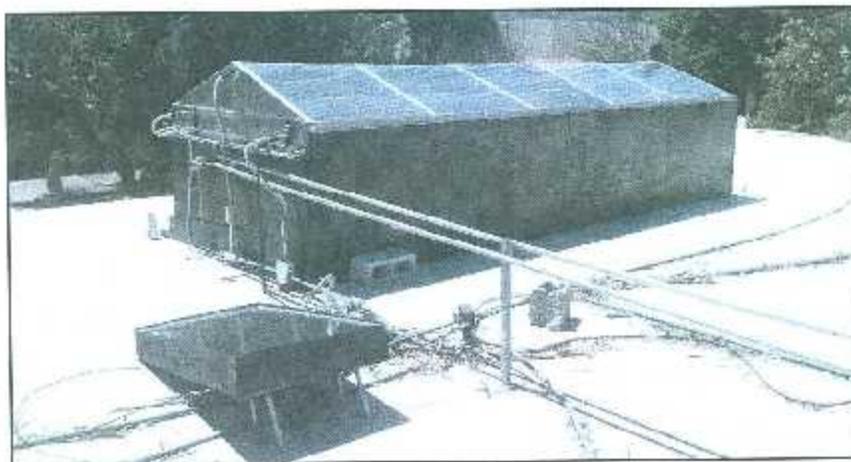


Figura 4.1 Destilador Solar de Alto Rendimiento instalado en el ITL.

La siguiente figura muestra los demás elementos del sistema del destilador solar de alto rendimiento, los tanques de almacenamiento y los tableros de control.

FECHA	CONDUCTIVIDAD (µmhos)				PRODUCCIÓN			RADIACIÓN PROMEDIO	EFICIENCIA		
	Temperatura Agua	Temperatura Destilado	Temperatura Charola	Temperatura Agua	Producción (L)	Medida	Desviación estándar		%	PROMEDIO	Desviación estándar
01-02-12	38.0	30	68.4	39.8	16.8	9.5	7.6	5120.34	19.67	17.3	7.0
11-02-12	17.4	17	93.7	90.2	13.2	8.1	7.5	5051.72	15.01	7.5	0.5
20-02-12	25.0	25.0	38.6	103.4	3.0	14.5	4.5	4663.26	11.49	12.6	5.9
25-02-12	5.0	5.3	101.4	119.5	17.2	15.6	4.0	5438.66	2.59	18.7	0.5
01-03-12	2.4	12.5	96.4	110	26.1	17.3	5.4	6429.20	27.51	21.2	0.9
05-03-12	2.9	6	150.7	116.3	23.2	15.1	5.2	6234.14	24.93	24.2	2.4
11-03-12	3.5	5	107.3	104	17.6	17.6	4.7	6716.96	17.98	16.0	0.2
15-03-12	3.7	7.2	96.9	105.3	20.0	17.5	4.5	5792.63	23.31	21.2	0.7
21-03-12	22.9	19	106.5	135	24.0	19.6	4.8	7110.91	22.69	23.1	0.4
25-03-12	5.6	11.3	91.2	127.4	17.7	19.6	5.3	7171.52	25.90	29.5	1.0
01-04-12	7.0	7.1	102.3	129.4	25.6	20.2	5.4	8147.36	20.56	22.4	1.3
05-04-12	3.8	6.4	95.4	142.5	23.2	21.1	5.7	6568.63	15.27	22.3	0.6
10-04-12	12.3	20	119.3	171.1	33.6	22.1	6.3	8263.44	27.24	27.4	0.7
15-04-12	3.3	7	119.3	171	33.6	23.1	6.7	6422.64	26.72	28.0	0.6
17-04-12	3.1	5.6	109.2	160.9	47.2	23.2	7.7	8125.57	37.53	34.1	2.9
19-04-12	2.9	6	100.7	116.8	34.4	24.4	7.3	7351.59	23.35	28.4	0.9
25-04-12	2.8	7	125	176	33.6	25.2	7.3	6740.35	25.75	24.4	0.6
30-04-12	2.8	5	110.7	147.3	32.6	25.7	7.5	8484.38	26.91	29.2	2.2
05-05-12	3.0	3.9	112.4	155	32.8	26.1	7.3	6025.11	27.38	27.7	1.0
10-05-12	2.8	4.6	112.7	137	20.0	26.5	8.0	7741.22	17.31	27.6	1.6
15-05-12	2.7	4.8	85.5	120.8	25.3	26.5	7.3	4162.04	27.37	25.3	6.7
18-05-12	19.7	5.9	87.8	130.8	13.6	26.2	8.0	7153.01	12.73	15.8	5.7
20-05-12	2.6	12.1	97.2	156.4	56.0	26.6	8.0	7410.61	32.54	16.3	0.4
25-05-12		5.6	120	103	0.0	26.4	8.6	3444.20	7.00	16.9	11.1
22-05-12	2.4	6.6	120	101	40.0	26.5	8.7	7925.77	35.29	32.5	1.6
25-05-12	2.6	7.7	138.5	177.8	36.0	26.9	8.7	6327.22	34.84	31.0	0.4
31-05-12	2.8	2.8	109.6	143.3	40.0	27.2	8.7	6441.08	31.74	31.9	3.0
05-06-12	2.3	3.1	91.3	135	35.2	27.8	8.8	8354.29	31.42	31.1	1.1
10-06-12	5	2.3	135.7	131.9	32.4	28.3	8.8	7386.86	27.64	25.6	1.7
11-06-12	4	3.1	109.3	131.7	28.0	28.5	8.6	7621.53	23.98	25.8	0.9
20-06-12	17	3.3	99.8	112.9	43.9	28.6	9.1	6543.05	34.02	34.7	1.7
25-06-12	3.7	3.6	102.4	123.3	33.9	29.2	9.4	8470.66	31.55	31.4	0.4
01-07-12	3.3	3.7	106	124.4	40.0	23.8	3.5	4669.41	57.14	58.0	10.3
10-07-12	2.8	3.8		175.2	52.0	23.7	10.0	6533.52	40.29	36.4	0.2
22-07-12	2.6	2.5	104.6	105.1	22.0	23.8	10.0	4510.14	32.40	32.7	

Tabla 4.1. Registro de producción, conductividad y cálculo del porcentaje de eficiencia.

Posteriormente, se calculó el porcentaje de eficiencia del destilador de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Ef} = \left[\frac{(\text{Producción l}) * (627)}{(\text{Área DS m}^2) * (\text{Radiación promedio})} \right] * 100 \quad (1)$$

La cantidad 627 en la ecuación 1 se refiere a la constante de vaporización del agua, mientras que el área del destilador corresponde a 9.36 m² correspondiente al área de la charola. La gráfica 4.3 muestra la eficiencia graficada contra la producción y la calidad del agua producto.

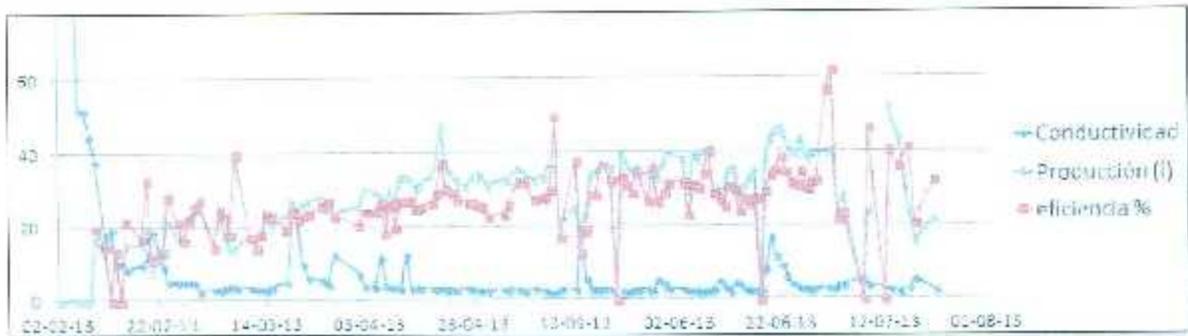


Figura 4.3. Gráfica de conductividad de agua producto, producción de agua destilada y porcentaje de eficiencia.

La conductividad del agua producto fue de 12 mS/m (de 2002 a 2012). La conductividad promedio de la alimentación es de 1030 mS/m durante 2013. El valor de la conductividad del agua producto del destilador se encuentra entre 2.4 y 5.6 mS/m en condiciones normales de operación por lo que cumple con el criterio establecido para agua destilada, sin embargo se pudieron observar algunos incrementos pero por factores del entorno.

El costo promedio del agua producida es de aproximadamente \$ 20.00 M.N./m³. Este último cálculo se obtiene amortizando el costo inicial del destilador a lo largo de su vida útil y relacionándolo con la producción total esperada para ese periodo.

El costo inicial del proyecto está en función del costo de los materiales y la técnica de construcción utilizados para el destilador mencionado el costo de fabricación fue de aproximadamente \$130,000.00 M.N. que incluye sensores y material de cableado y canalización del sistema de instrumentación y control.

Debido a la sencillez del equipo, no se requirió de personal altamente calificado para su manejo, mantenimiento ni reparación para las fallas que se presentaron.

4.3. Sistema de monitoreo y manipulación de las variables del proceso

El diseño final de la pantalla principal del sistema de monitoreo y manipulación de variables del proceso del destilador solar de alto rendimiento se muestra en la figura 4.4. La interface es sencilla de manipular y amigable para el usuario. El intervalo para la actualización de los datos se puede modificar por programa si es necesario.

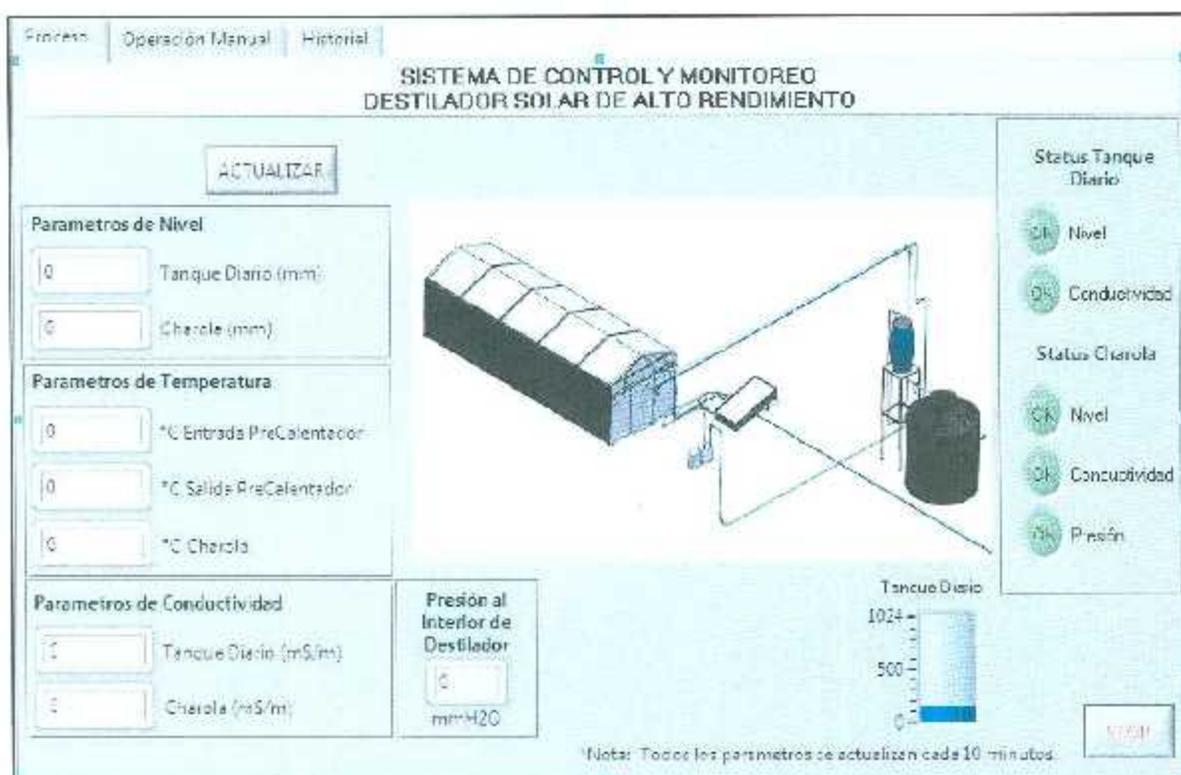


Figura 4.4. Pantalla principal de la interface de monitoreo y manipulación de variables.

La figura 4.5 muestra el diseño final de la pantalla para la operación manual de las electroválvulas del tanque diario y de la línea de purga. Esta parte de la interface interrumpe el proceso automático de control para accionar los actuadores de manera independiente.

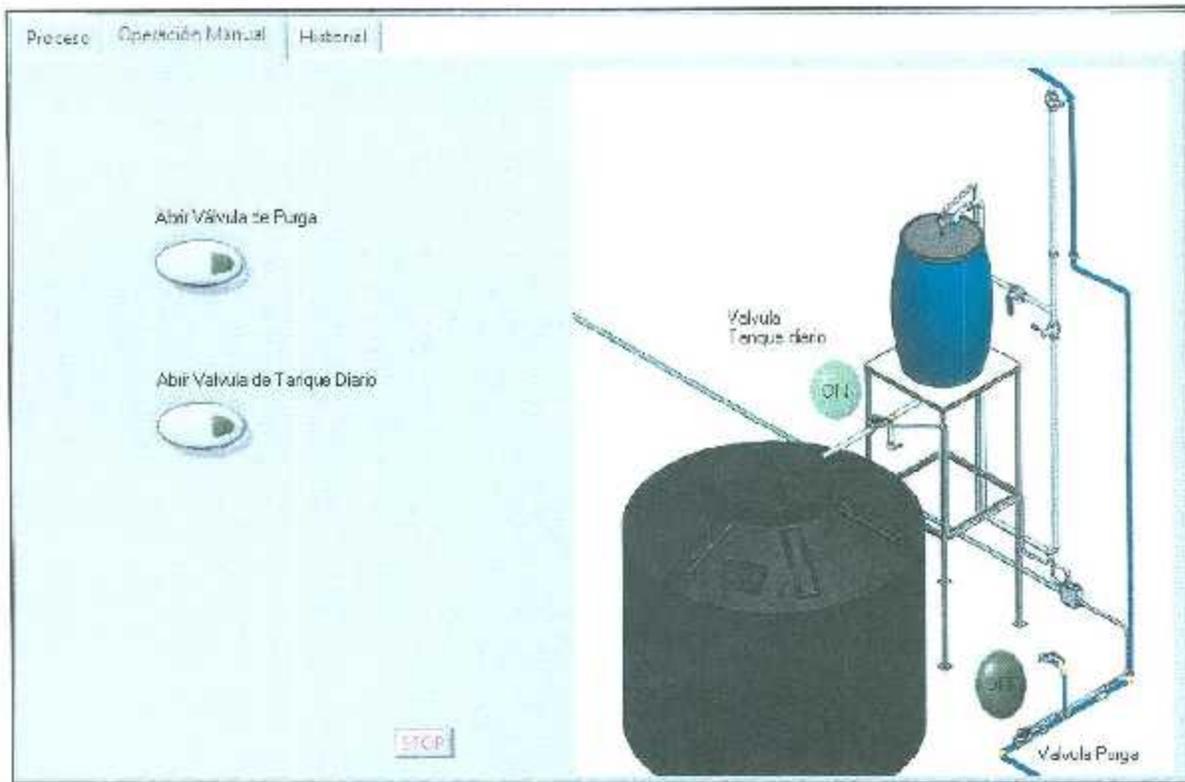


Figura 4.5. Pantalla de manipulación de actuadores del sistema.

4.4. Pruebas de los sensores en campo.

El sistema está basado en una plataforma de hardware suficientemente robusto, capaz de operar en condiciones extremas de medio ambiente.

Los sensores conectados e instalados de acuerdo a las especificaciones del fabricante operan de manera confiable como los muestran las siguientes tablas concentradoras de los resultados de las pruebas. Los materiales utilizados en estos sensores son de uso industrial con lo que garantizan un tiempo de vida largo así como un desempeño estable en cuanto a las señales de salida que entregan.

Se realizaron mediciones con multímetro a la salida de cada sensor, y a la salida de la tarjeta de acondicionamiento de señales desarrollada para esta aplicación.

Para la prueba en campo del sensor de nivel de agua destilada en el tanque diario se hicieron mediciones con diferentes niveles de agua en el tanque. Para ello se utilizó una manguera para ir aumentando el nivel del agua. Debido a que el recipiente es de pared sólida no translúcida las mediciones de la altura que se presentan son aproximadas.

Pruebas de Sensor Nivel en Tanque Diario		
Nivel de agua en Tanque diario (mm)	Voltaje a la salida del sensor (V)	Salida Tarjeta Acondicionamiento de señales (V)
0	6.92	3.46
100	6.15	3.08
200	5.38	2.69
300	4.61	2.31
400	3.84	1.92
500	3.07	1.54
600	2.31	1.16
700	1.54	0.77
800	0.77	0.39
900	0.00	0.00
1000	0.00	0.00
1100	0.00	0.00

Tanque vacío

Nivel del sensor.

Table 4.2. Resultados de la prueba en campo del sensor de nivel de agua en tanque diario.

Para la prueba del sensor de nivel en la charola del destilador, se generaron diferentes condiciones de nivel. Para lograr un nivel alto en charola se alimentó externamente el destilador por uno de los barrenos de los sensores, pues la entrada de agua cruda se controla por medio de un flotador. Se asegura que la línea de

purga se encuentre cerrada para incrementar el nivel del agua en la charola. Posteriormente se cerró la válvula de paso de la línea de alimentación de agua y se fue bajando el nivel activando periódicamente la válvula de la línea de purga. Los resultados aproximados de esta prueba se muestran en la tabla 4.3.

Nivel de agua en Charola (mm)*	Voltaje a la salida del sensor (V)	Salida Tarjeta Acondicionamiento de señales (V)
0	3.61	1.81
10	3.39	1.70
20	3.20	1.60
30	2.97	1.49
40	2.81	1.41
50	2.62	1.31
60	2.39	1.20
70	2.18	1.09
80	2.02	1.01
90	1.79	0.90
100	1.58	0.79
110	1.39	0.70
120	1.22	0.61
130	1.00	0.50
140	0.81	0.41
150	0.60	0.30
160**	-	-
170**	-	-
180**	-	-

Charola vacía

* Valores aproximados

**Niveles de agua que no se pudieron alcanzar

Tabla 4.3. Resultados de la prueba en campo del sensor de nivel de agua en charola.

Debido a la dificultad de maniobrar los sensores instalados en la tubería, se probó el modelo del sensor de temperatura fuera de campo, con ayuda de un recipiente con agua a diferentes temperaturas las cuales se referenciaban por medio

de un multímetro que cuenta con un medidor de temperatura comercial. Los resultados de la prueba se presentan en la tabla 4.4.

Pruebas de Sensores de Temperatura		
Temperatura de Agua (°C)	Voltaje a la salida del sensor (mA)	Salida Tarjeta Acondicionamiento de señales (V)
15	9.20	1.63
20	9.62	1.75
25	10.01	1.88
30	10.39	2.00
35	10.78	2.13
40	11.18	2.25
45	11.62	2.38
50	12.01	2.50
55	12.38	2.63
60	12.81	2.75
65	13.19	2.88
70	13.60	3.00
75	13.98	3.13
80	14.41	3.25
85	14.78	3.38

Tabla 4.3. Resultados de la prueba de los sensores de temperatura.

La tarjeta de desarrollo Arduino resulta confiable. Los sensores se conectan a los puertos de entrada del microcontrolador (análogos) por medio de tarjetas de conexión que cuentan con terminal de tornillo.

Se verifica la entrega de las señales análogas de 0 a 5 de la tarjeta de acondicionamiento de señales a los pines de la tarjeta Arduino.

4.5. Publicaciones y participación en congresos.

- a) Participación en el 5º Encuentro Regional de Investigadores y 4º Encuentro de Jóvenes Investigadores.
Fecha: 16 y 17 Mayo 2013
Lugar: CIESLAG - UAAAN - Unidad Laguna
Mesa 1 Medio ambiente, agua y cambio climático
Ponencia: "Diseño y fabricación de un destilador solar de alto rendimiento".

- b) Publicación CIESLAG Libro de ponencias.
Editorial RUCERHALL, S.A. de C.V.
Calzada México Tacuba 1595, Edificio Dacca #306
11230 México, D.F. www.rucerhall.com
ISBN 978-607-8258-01-7
Impreso en México. Printed in Mexico.
Título del Artículo: "Diseño y fabricación de un destilador solar de alto rendimiento".
Paginas: 1 a 7.

- c) Participación en el Evento Nacional De Innovación Tecnológica 2013.
Convocatoria 2013. Etapa Local. (Figura 4.6).
Fecha: 21 y 22 Mayo 2013
Lugar: Instituto Tecnológico de la Laguna
Categoría: Proyectos De Innovación Tecnológica y Proyectos De Investigación Aplicada En Producto
Área de Participación: Agua
Proyecto: Diseño y fabricación de un destilador solar de alto rendimiento.
Resultado: PRIMER LUGAR (Figura 4.7).



Figura 4.6. Reconocimiento de participación ENIT 2013.



Figura 4.7. Reconocimiento Primer Lugar.

- d) Participación en el Evento Nacional De Innovación Tecnológica 2013.
Convocatoria 2013. Etapa Regional.
Fecha: 10 al 13 de Septiembre 2013
Lugar: Instituto Tecnológico de Hermosillo. Hermosillo, Sonora, México.
Categoría: Proyectos De Innovación Tecnológica y Proyectos De Investigación Aplicada En Producto
Área de Participación: Agua
Proyecto: Diseño y fabricación de un destilador solar de alto rendimiento.
- e) Participación en Coloquio de Investigación Multidisciplinaria Evento Internacional 2013.
Fecha: 24 y 25 de Octubre 2013
Lugar: Instituto Tecnológico de Orizaba. Orizaba, Veracruz, México.
Ponencia: 155. Diseño, fabricación y automatización de un destilador solar de alto rendimiento.
Área de participación: Ingeniería Química.



Figura 4.8. Reconocimiento de participación CIM2013, Orizaba, Veracruz.

Conclusiones

El agua obtenida en el destilador solar puede ser utilizada en todos los procesos que se llevan a cabo en los laboratorios de química y mecánica, así como en el CIM del Instituto Tecnológico de la Laguna, ya que los costos resultan accesibles y el volumen de agua destilada que se pretende obtener con este equipo cubren el ciento por ciento de la demanda, además, la calidad del agua obtenida es óptima para usarla en los procesos de los laboratorios de análisis donde la calidad requerida por es de 20 mS/m máximo.

Si comparamos el precio del agua desmineralizada en el mercado de la región que es de \$43.43 pesos por metro cúbico, datos proporcionados en la Central Termoeléctrica de Lerdo CFE y cuyo precio no incluye costos por energía eléctrica ni mano de obra; con el costo promedio del agua producida por el Destilador Solar De Alto Rendimiento que es de \$20 pesos por metro cúbico, resulta inferior en poco más de un 50%. Sin embargo, como el proyecto no pretende la comercialización del agua destilada, el ahorro energético resultante de la aplicación de la tecnología para el ITL es óptimo, ya que no consume electricidad para su funcionamiento, y al compararlo con otros procesos de destilación convencional como equipos eléctricos y osmosis inversa se puede decir que el costo es mínimo, pues solo se consideraría la inversión inicial para su construcción.

Para los lugares que presentan condiciones de radiación favorables donde no existen otras opciones, se recomienda ampliamente el uso de la energía solar para la purificación del agua a través de estos equipos, se concluye que es la mejor opción debido a que el uso de una fuente renovable de energía y no petróleo o sus derivados, importados y no reemplazables, etc., favorece a la comunidad.

Por otro lado, el desarrollo de este sistema de instrumentación y su monitoreo permite la operación automática de todo el proceso y además facilita el registro y

almacenamiento en formato digital permitiendo variar los intervalos de tiempo entre registro y registro.

El sistema de instrumentación propuesto representa entonces, una buena alternativa para implementar interfaces de monitoreo en proyectos similares que se lleven a cabo al interior de la universidad, pues se trata de una aplicación desarrollada con recursos locales disponibles (proveedores, recurso humano, documentación propia, materiales reutilizados, etc.) lo que facilita cualquier modificación para personalizarla según la aplicación.

Los componentes usados, muestran un desempeño al mismo nivel de cualquier aplicación comercial e incluso industrial. Se muestra su efectividad, al trabajar en condiciones de alta temperaturas, expuestos a los agentes de la intemperie como viento, lluvia y contaminación.

La interfaz gráfica resulta amigable con cualquier nivel de usuario. La ventana principal muestra las mediciones de cada sensor de manera centralizada y ordenada, no es necesario que el usuario haga algún tipo de conversión de unidades. Su manejo es sencillo y no requiere capacitación extensa para su operación. Se generó el archivo ejecutable de la aplicación lo que permite proteger el código de programa y facilita su ejecución, ya que no es necesario instalar algún otro software.

La interface de monitoreo interactúa por medio de comunicación serial con el controlador Arduino, de esta manera se logra que el sistema de control del proceso del destilador solar no dependa de la interfaz gráfica para su funcionamiento, si no que solo comparte la información para su despliegue en pantalla.

El sistema utiliza 2 tarjetas de relevadores, los cuales se utilizan para activar los actuadores del sistema así como las alarmas visuales, el diseño sencillo de esta

etapa de potencia permite acoplar actuadores con diferentes voltajes de alimentación, en caso de ser necesario.

Mediante el control automático parcial por lógica difusa del proceso de destilación solar, en la etapa de purga de la charola del destilador solar (agua residual del proceso), se logró controlar adecuadamente el actuador: electroválvula, empleando lapsos de trabajo variados, permitiendo prolongar la vida útil del actuador. El control del nivel en la charola implementado con Lógica Difusa posee la ventaja de no necesitar un modelo matemático preciso del sistema a controlar.

Al mantener el hermetismo del sistema, la presión interna aumenta y favorece la disminución de la temperatura de ebullición del agua por lo que se puede obtener un proceso más eficiente generando agua destilada en menor tiempo. El sensor de presión implementado permite verificar la ausencia de fugas o grietas en el equipo y de esta manera asegurar el hermetismo.

Los resultados obtenidos son satisfactorios pues se cumplieron los objetivos planteados para el proyecto.

Trabajo a futuro

El número de variables monitoreadas son aptas para esta etapa del proyecto, sin embargo existen más variables que pueden agregarse como el índice de radiación UV. Así mismo, de acuerdo a la documentación técnica que se ha consultado, se sabe que la máxima producción del destilador puede ser cuando los vidrios ya no reciben la radiación solar y bajan la temperatura de sus caras exteriores, lo que propicia una mayor condensación en el interior del equipo. Se recomienda para este proyecto buscar técnicas de enfriamiento de los vidrios después de la jornada de sol por medio de actuadores como ventiladores. El

hardware y el software están preparados para agregar cualquiera de estos elementos, actuadores o sensores, con algunos cambios sutiles.

Se recomienda implementar un sistema de almacenamiento de datos independiente de la computadora, ya que con el sistema actual los registros solo se guardan cuando el equipo de cómputo está encendido y en línea con el sistema.

Referencias bibliográficas

- [1] Solsona F., Mendez J. P. "Desinfección del agua". Agencia Ambiental de los Estados Unidos de América USEPA, OPS, CEPIS. EUA 1983.
- [2] Mourato, D. "Aplicaciones de las membranas de microfiltración y nanofiltración en el área de agua potable". Trabajo presentado en el Simposio OPS: Calidad de Agua, Desinfección Efectiva. 1998. Disponible en la OPS/CEPIS.
- [3] Torres M. "Avances Técnicos en la Desalación de Aguas, en ambiente". Centro de Estudios Hidrográficos (CEDEX). España 2004.
- [4] Reiff, F., Witt, V. "Guía para la selección y aplicación de tecnologías de desinfección del agua para consumo humano en pueblos pequeños y comunidades rurales en América Latina y el Caribe". Documento OPS/OMS, Serie Técnica No. 30. 1995.
- [5] Nandwani S. "Destilador solar: construcción, funcionamiento y uso", Seminario Las Aplicaciones Prácticas de la Energía Solar, Universidad Nacional Heredia, Costa Rica, pp.29, 2009.
- [6] Kumar A., Sootha G. D., Chaturvadi P., "Performance of a multi-stage distillation system using a flat-plate collector", Extended Abstract, ISES Solar World Congress, Kobe, Japan, 1989.
- [7] Pankratz. T., 2011. IDA Desalination Yearbook 2011-2012, Media Analytics Ltd, Oxford, UK.
- [8] Fuente: Diario Chaco. Número de Registro de la Propiedad Intelectual: 830014.

Registro de Marca Nro. 2.513.865 del Instituto Nacional de la Propiedad Industrial. Empresa Comercializadora: Loster S.R.L. - Mitre 572 - Resistencia - Chaco (3500). Octubre de 2011.

<http://diariochaco.com/noticia/116979/Ingenieria-diseno-equipo-Destilador-Solar-de-agua-para-el-INTA.html>

[9] Huevo Bautista F.R.; Morán Urrutia J. I. "Diseño, construcción y validación de un destilador solar para uso en los laboratorios de la planta piloto de la escuela de ingeniería química", Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de Ingeniería. San Salvador, Mayo de 2012.

[10] Almanza R.; "Ingeniería de la Energía Solar", primera edición, Primera Ed. México, DF. 1194. pp. 163-175.).

[11] Prieto Bolívar C. J., "El agua: sus formas, efecto y abastecimiento, usos, daños, control y conservación". Segunda Ed. Bogotá 2004. pp. 2-4.

[12] Rodríguez L. R., Saavedra A. W. "Diseño y construcción de un destilador solar de aguas Residuales", 2008.

[13] Gomez Morales S., Arteaga Ramírez R. "Elementos básicos para el manejo de instrumental meteorológico". Ed. CECSA, México. 1987.

[14] Hermosillo Villalobos J. J. "Notas sobre el curso de Energía Solar", Primera Edición, Febrero de 1995. México.

[15] Castro A., Barajas B., Moreno V. Universidad Autónoma de Coahuila. "Factibilidad de la implementación de una planta termosolar para la generación de energía eléctrica en torreón, Coahuila, México". XVI Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos. Valencia, 11-13 de julio de 2012.

- [16] Daniels, F. "Uso directo de la energía solar". Editorial Blume, Madrid, 1977.
- [17] García, X. "La energía solar térmica de alta temperatura como alternativa a las centrales térmicas convencional y nuclear". 2001. Disponible en: <http://www.iit.upcomillas.es/docs/IIT-01-1251.pdf>
- [18] Shyam S. Nandwani (*) Ph.D. Junio del 2005.
- [19] Shyam S. Nandwani, Ph.D. Profesor, Lab. de Energía Solar. Departamento de Física, Universidad Nacional, Heredia Costa Rica (2009).
- [20] Desalación mediante energía solar térmica directa
<http://news.soliclima.com/divulgacion/recursos-hidricos/desalacion-mediante-energia-solar-termica-directa>. (Consultada: 03 de noviembre de 2011).
- [21] (Kumaret. al., 2000) Kumar, S., Tiwari, G. and Singh, H. (2000) Annual performance of an active solar distillationsystem. *Desalination*, Vol 127, 79-88
- [22] Portal de energías renovables. "Los destiladores solares".
<http://www.sitiosolar.com/los%20destiladores%20solares.htm>. (Consultada: 03 de noviembre de 2011).
- [23] Paz Gutiérrez J. C. "Colectores solares planos. Tratamiento Teórico. Vol. 1". Universidad Autónoma De Ciudad Juárez. Instituto de Ingeniería y Tecnología. Ciudad Juárez, Chihuahua, México. 2006.
- Imou, K., M. Ishida, T. Okamoto, Y. Kaizu, A. Sawamura, N. Sumida; Ultrasonic Doppler Sensor for Measuring Vehicle Speed in Forward and Reverse Motions

Including Low Speed Motions; Agricultural Engineering International: the CIGR Journal of Scientific Research and Development. Manuscript PM 01 007. Vol. III.

[24] Sensores – Presión. Descripción y funcionamiento. Eduardo J. Carletti
http://robots-argentina.com.ar/Sensores_presion.htm. Robots Argentina
(Consultada: 24 de octubre de 2011).

[25] J. Fraden; Handbook of Modern Sensors; 2nd Edition; Springer-Verlag; 2007.

[26] L. Michalski, K. Eckersdorf, J. Kucharski; Temperature Measurement; John Wiley & Sons, Ltd.; 2001

[27] Robert Boylestad / Louis Nashelsky; Electrónica Teoría de Circuitos; Prentice Hall; Quinta Edición; 1994.

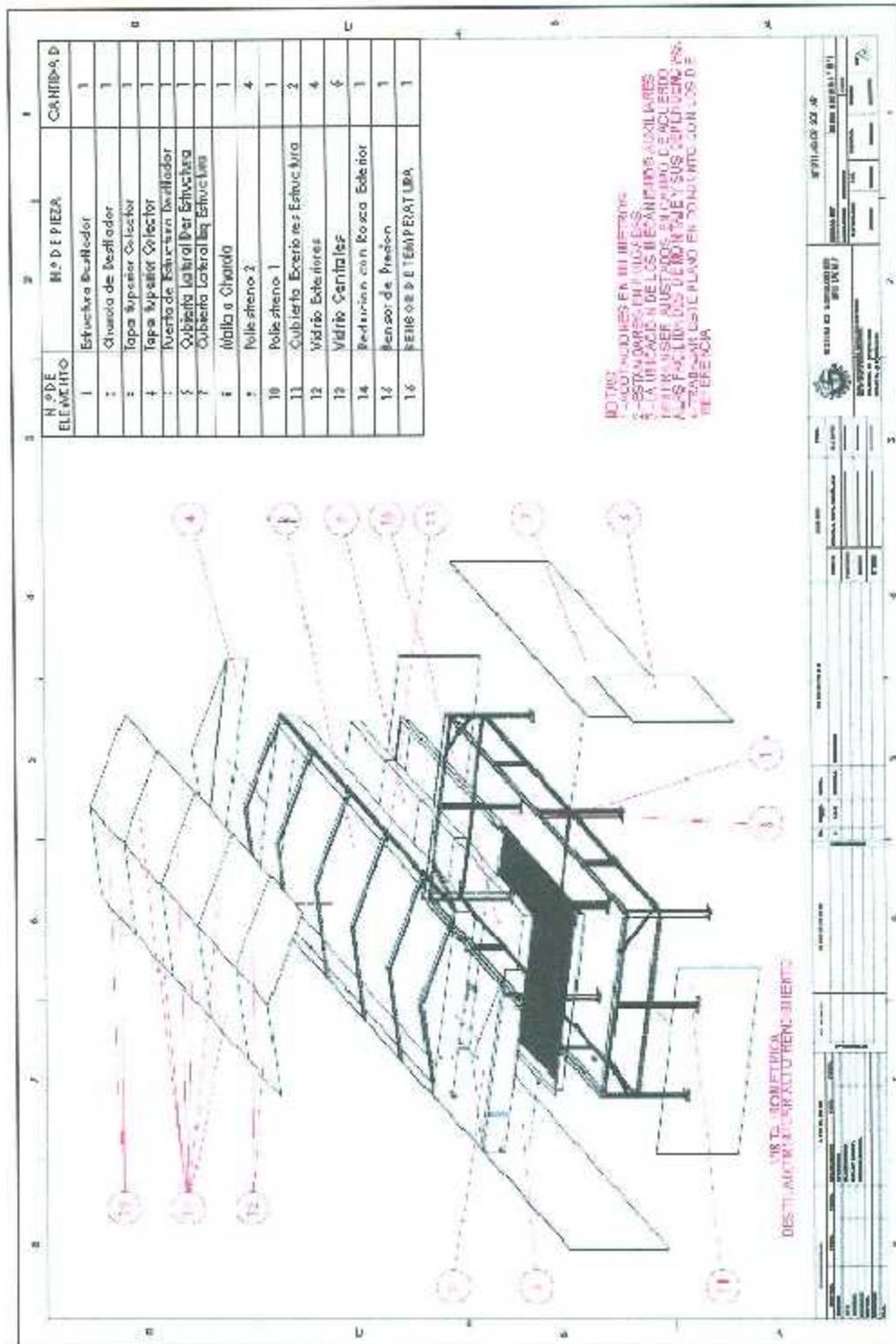
[28] Keith H. Billing; Switchmode Power Supply Handbook; McGraw-Hill, Inc.; 1989.

[29] Torres Torriti M. "Tutorial Microcontroladores Pic. Iniciación rápida". Version 1.0. Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile. 2007

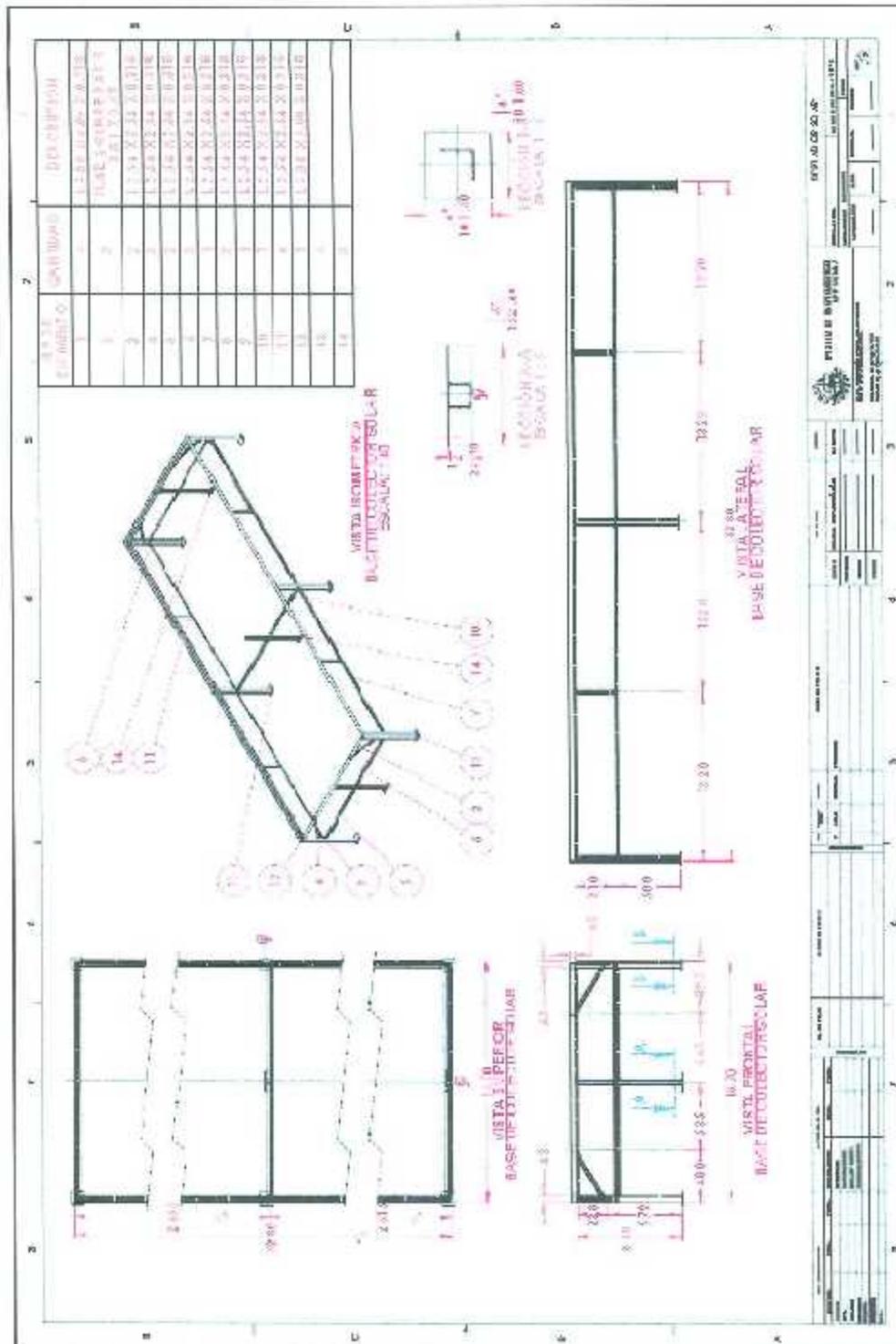
[30] Ozer, J.; Blemings, H. "Practical Arduino: Cool Projects for Open Source Hardware". (1ª edición). Apress. pp. 500. ISBN 1430224770. 2009.

[31] Universidad de las Americas Puebla. Simulación de un sistema de control difuso para el robot udlap. Capítulo 3. Lógica Difusa. México 2008.
http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lmt/ramirez_r_o/capitulo3.pdf.
(Consultada: 18 de Junio de 2012).

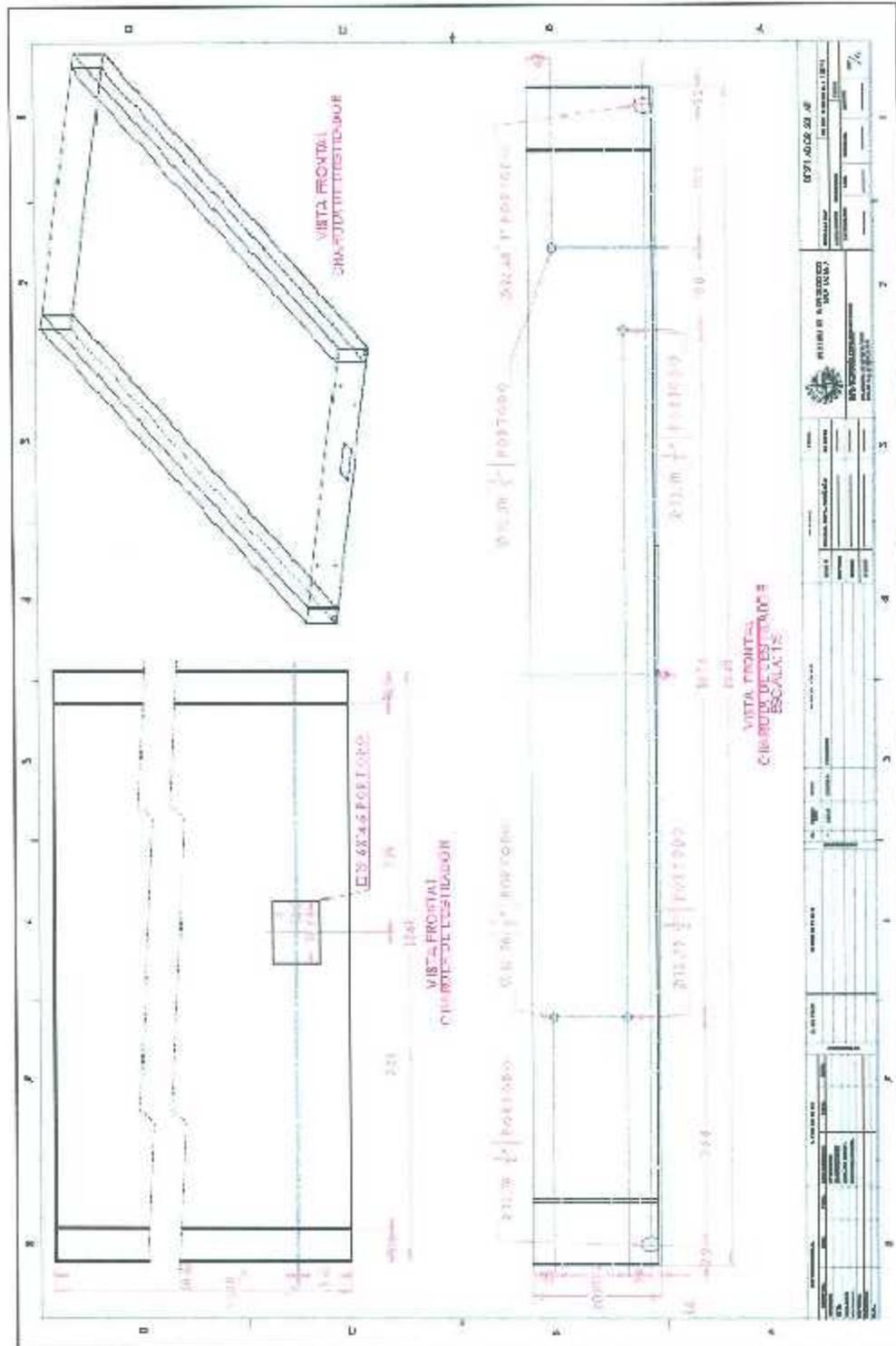
III. Plano de despiece de destilador solar de alto rendimiento



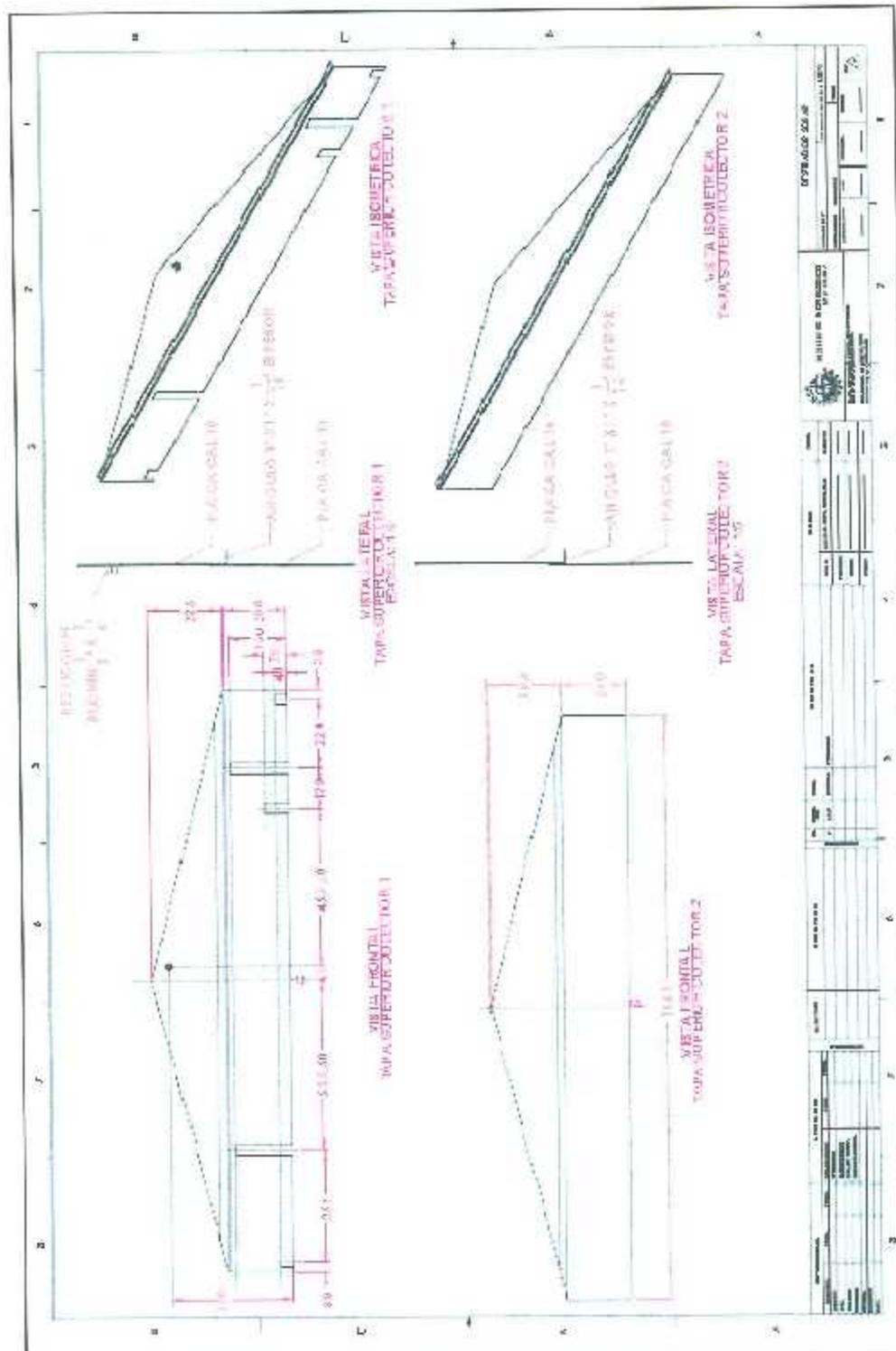
IV. Plano de estructura soporte



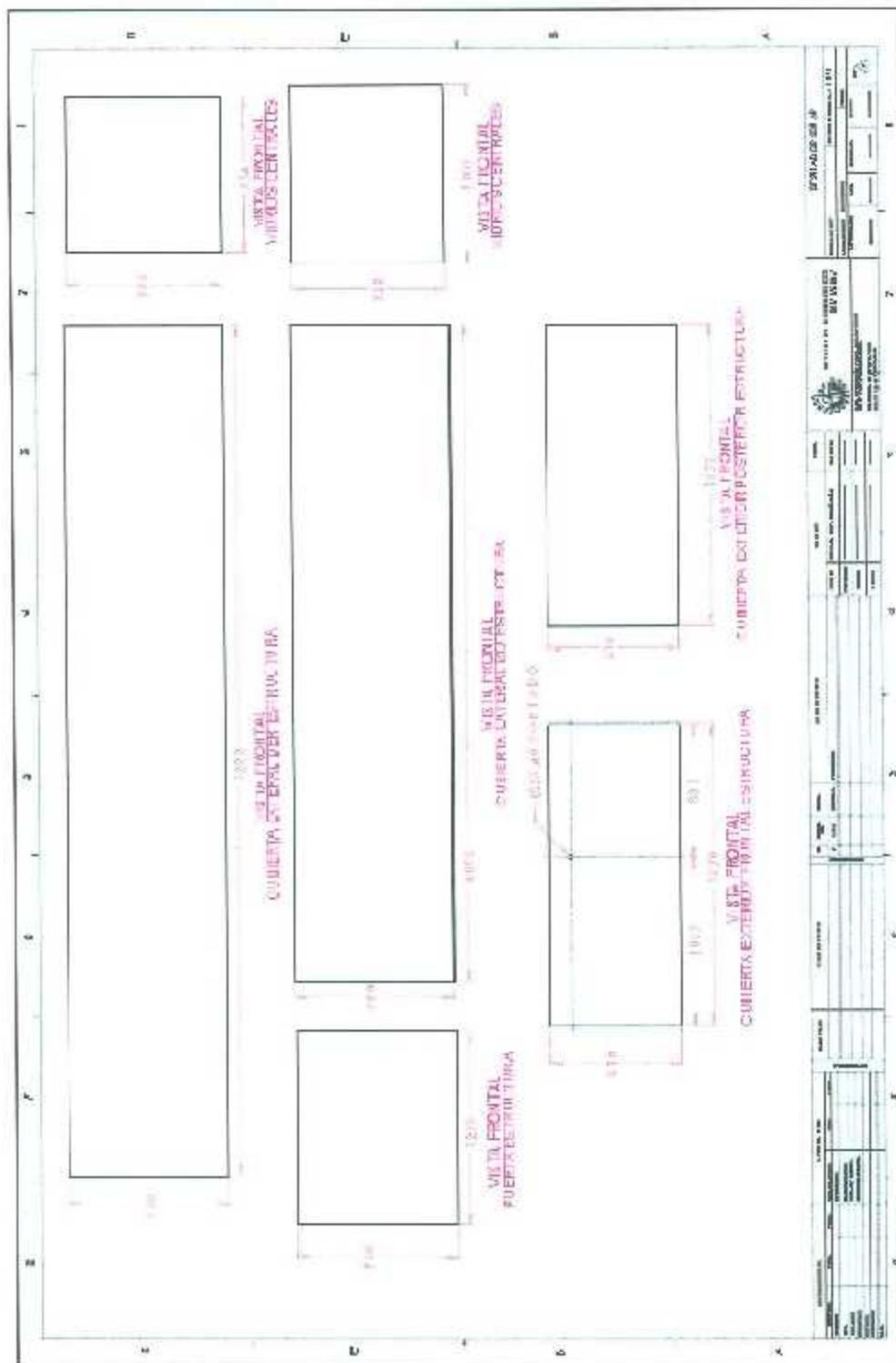
V. Plano de charola destilador solar



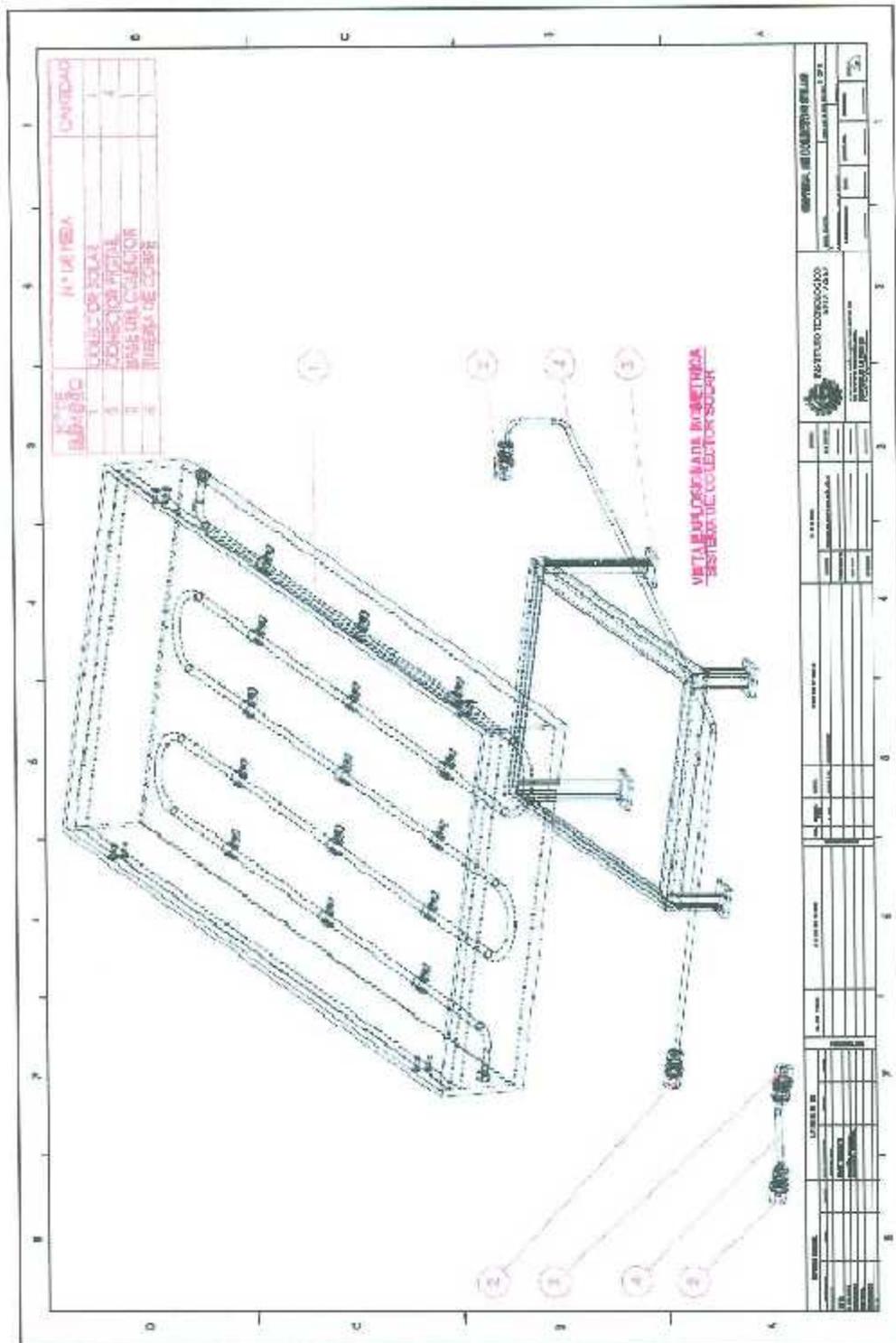
X. Plano detalle de fabricación tapas laterales destilador solar



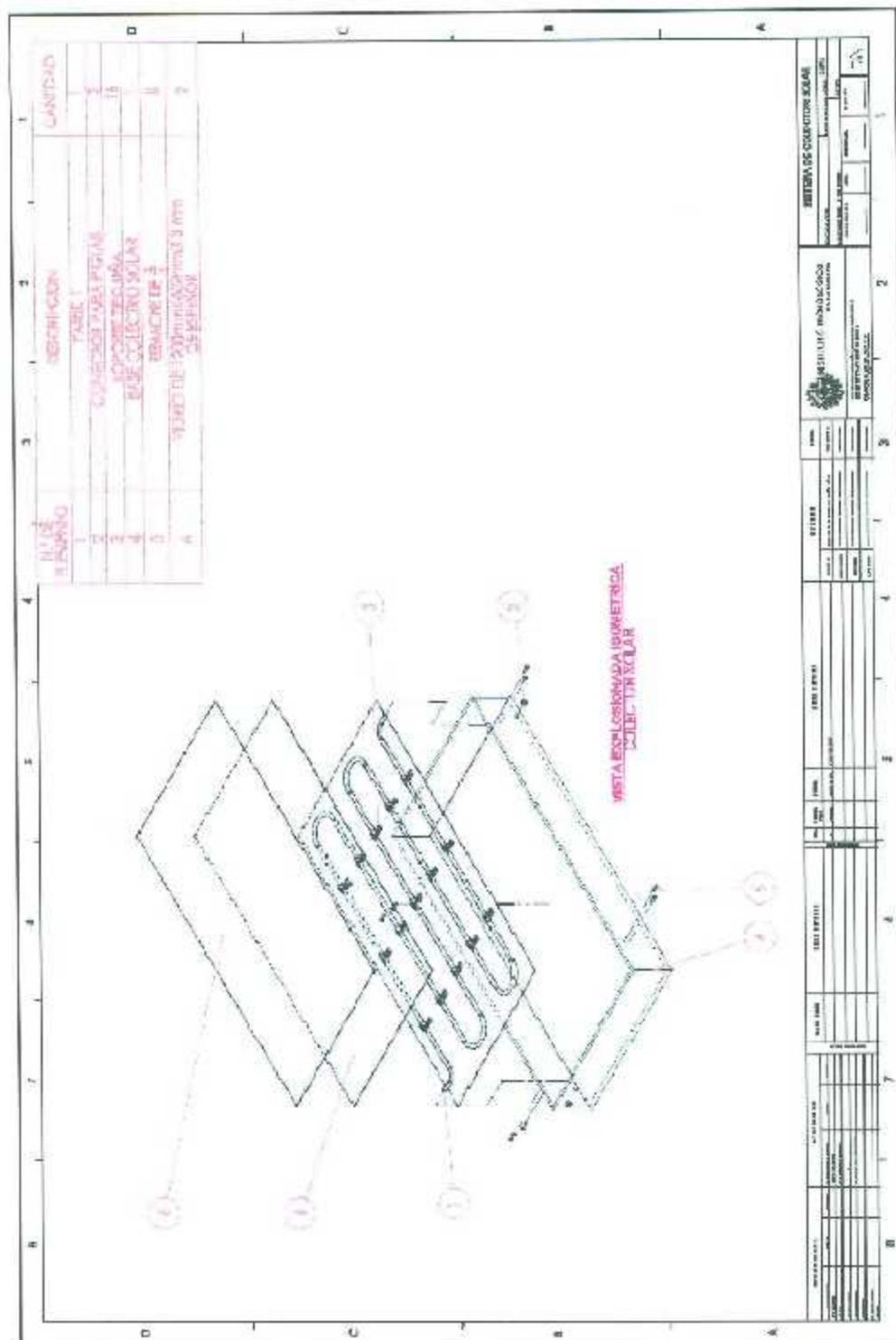
XI. Plano detalle de cortes para cubierta de madera y vidrios



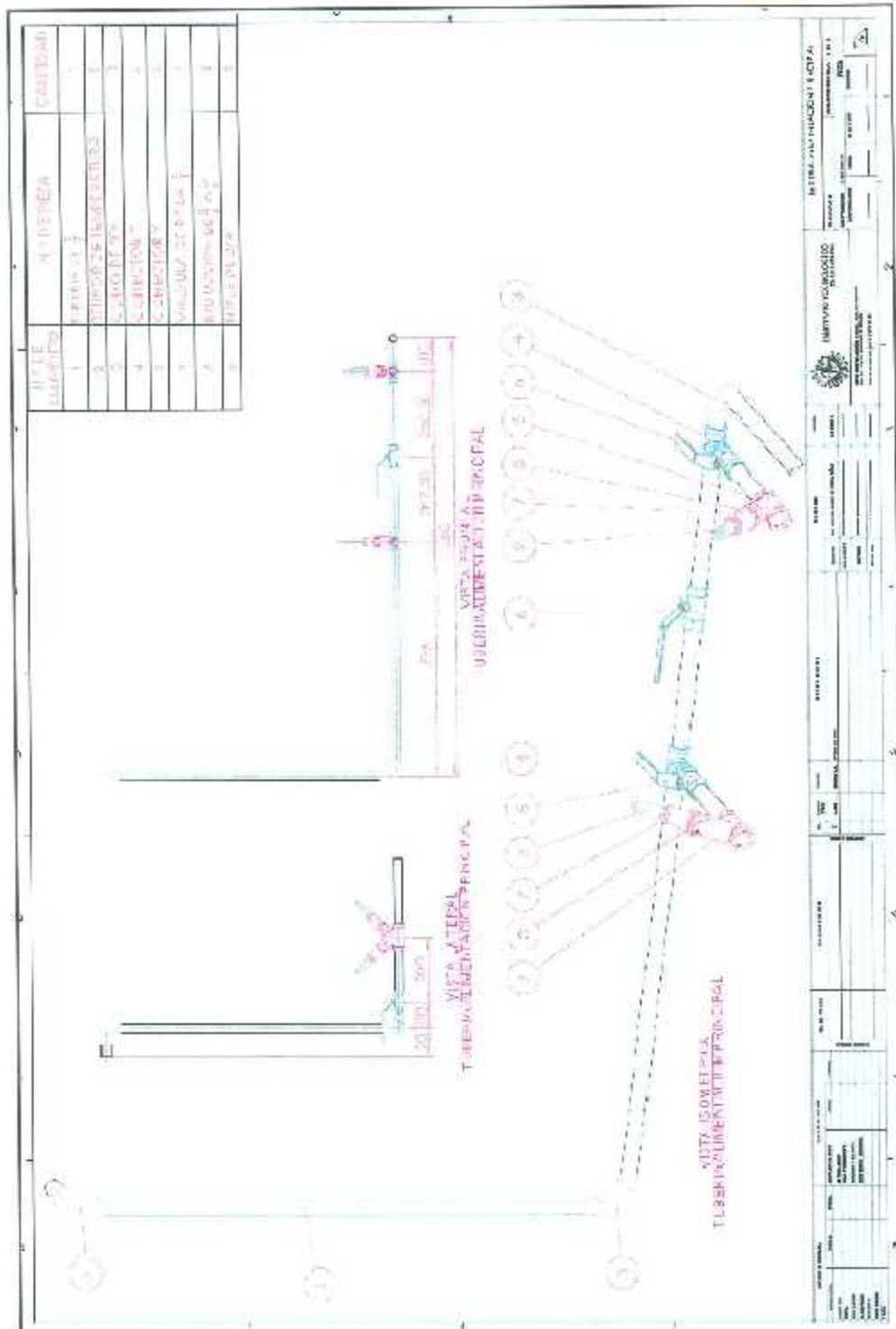
XII. Plano despiece de sistema de colector solar plano



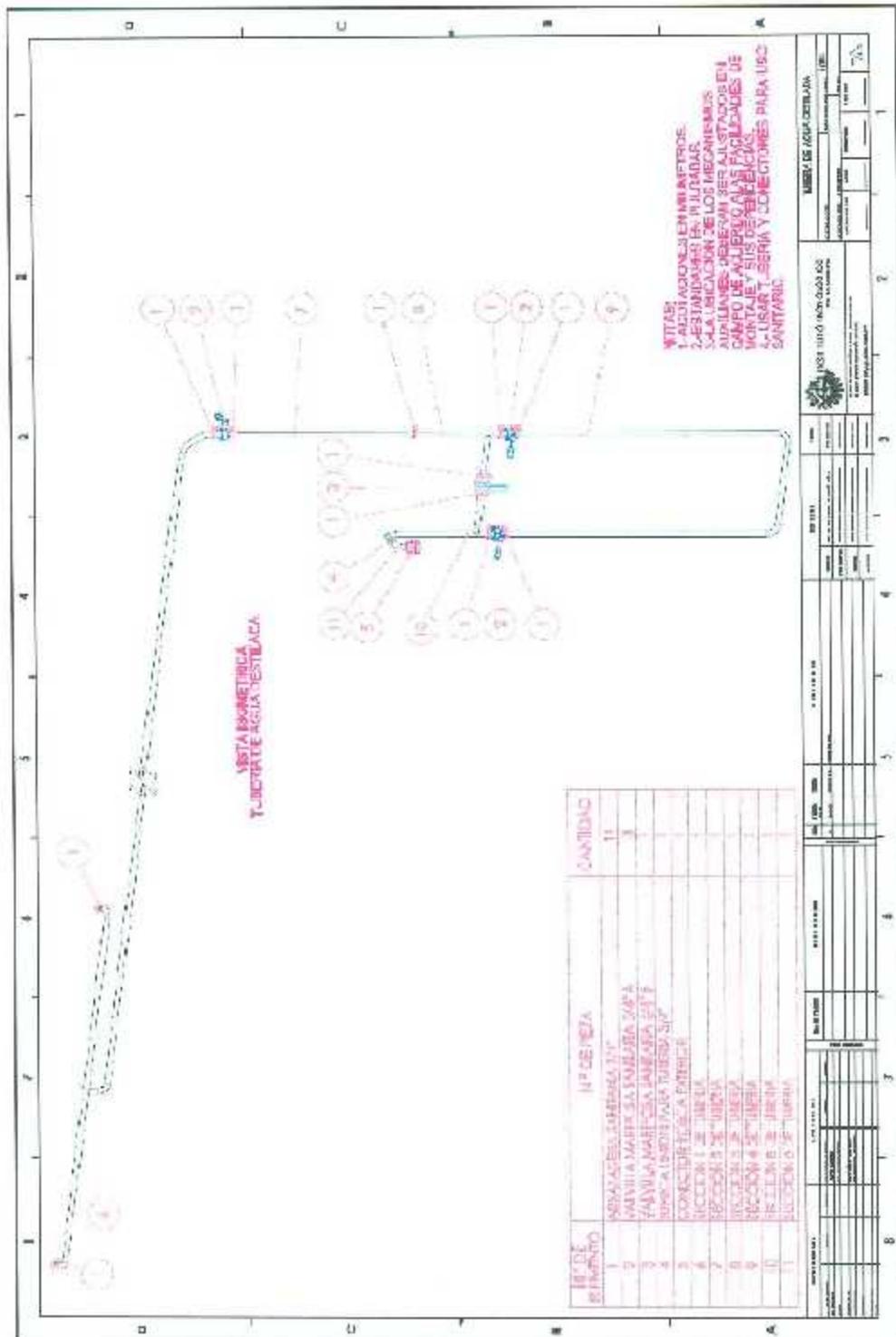
XIII. Plano detalle armado de estructura colector solar plano



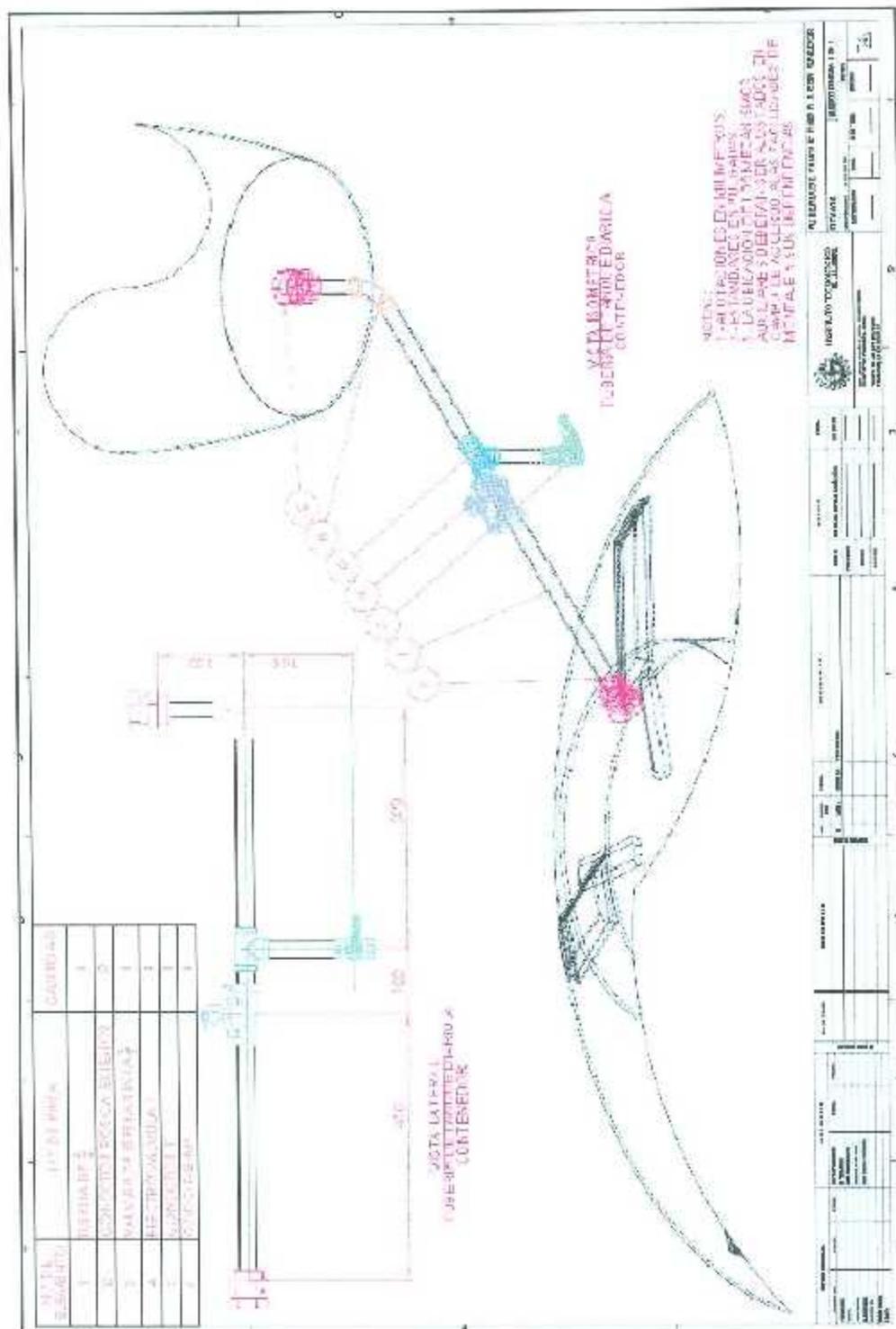
XVII. Plano tubería principal de alimentación (línea agua cruda)



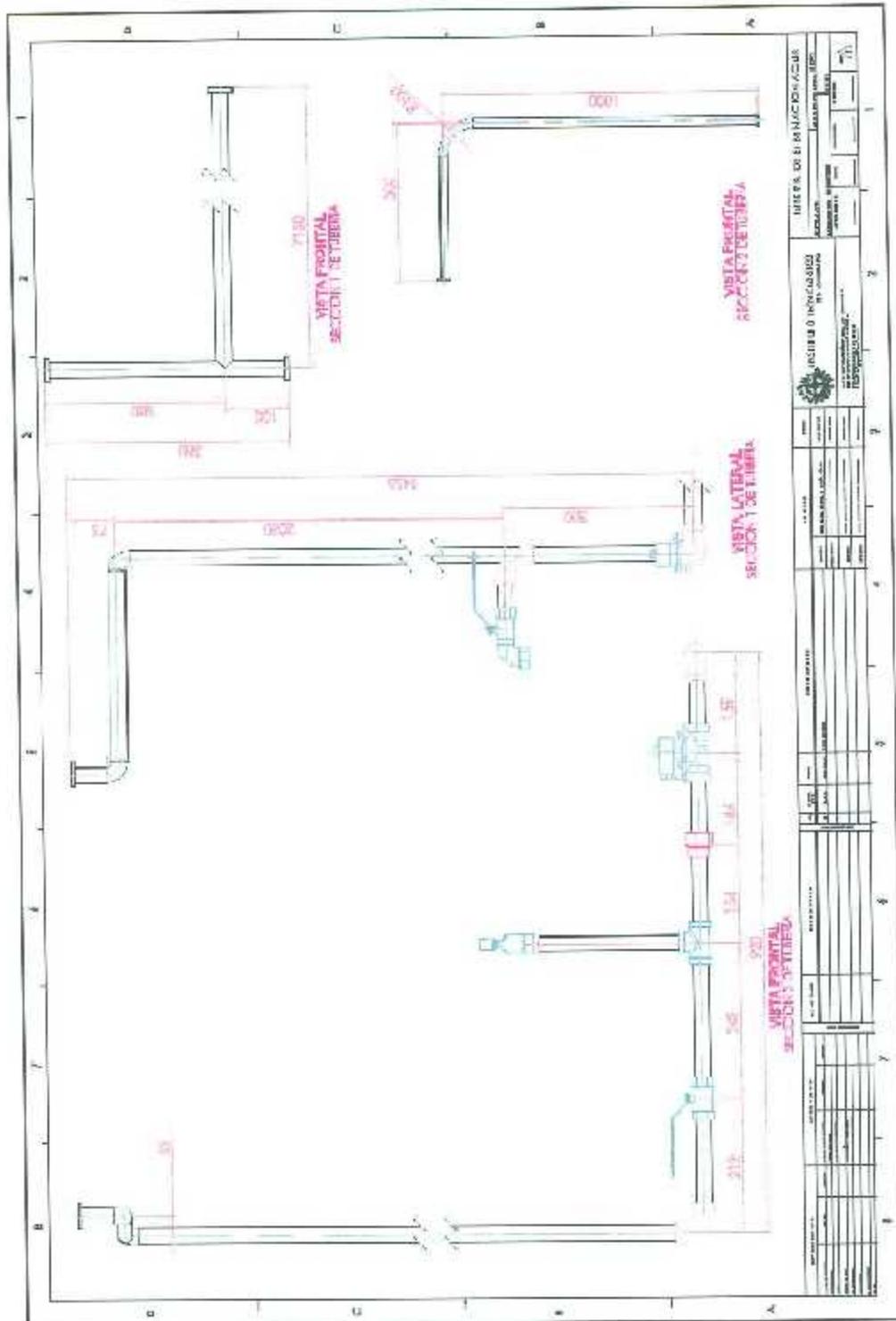
XVIII. Plano tubería agua destilada (línea agua producto)



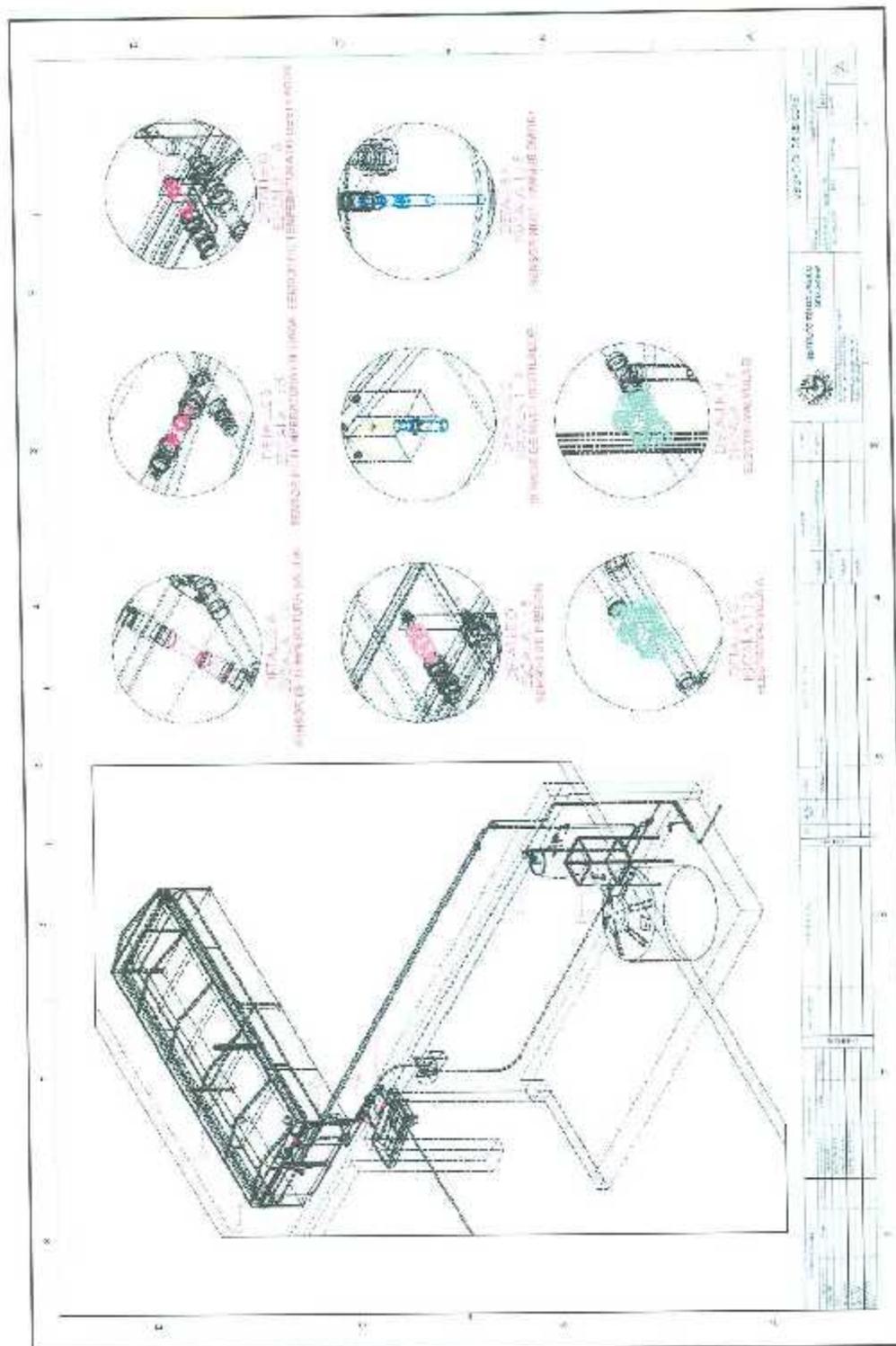
XXI. Plano tubería tanque de almacenamiento diario a tanque de almacenamiento general.



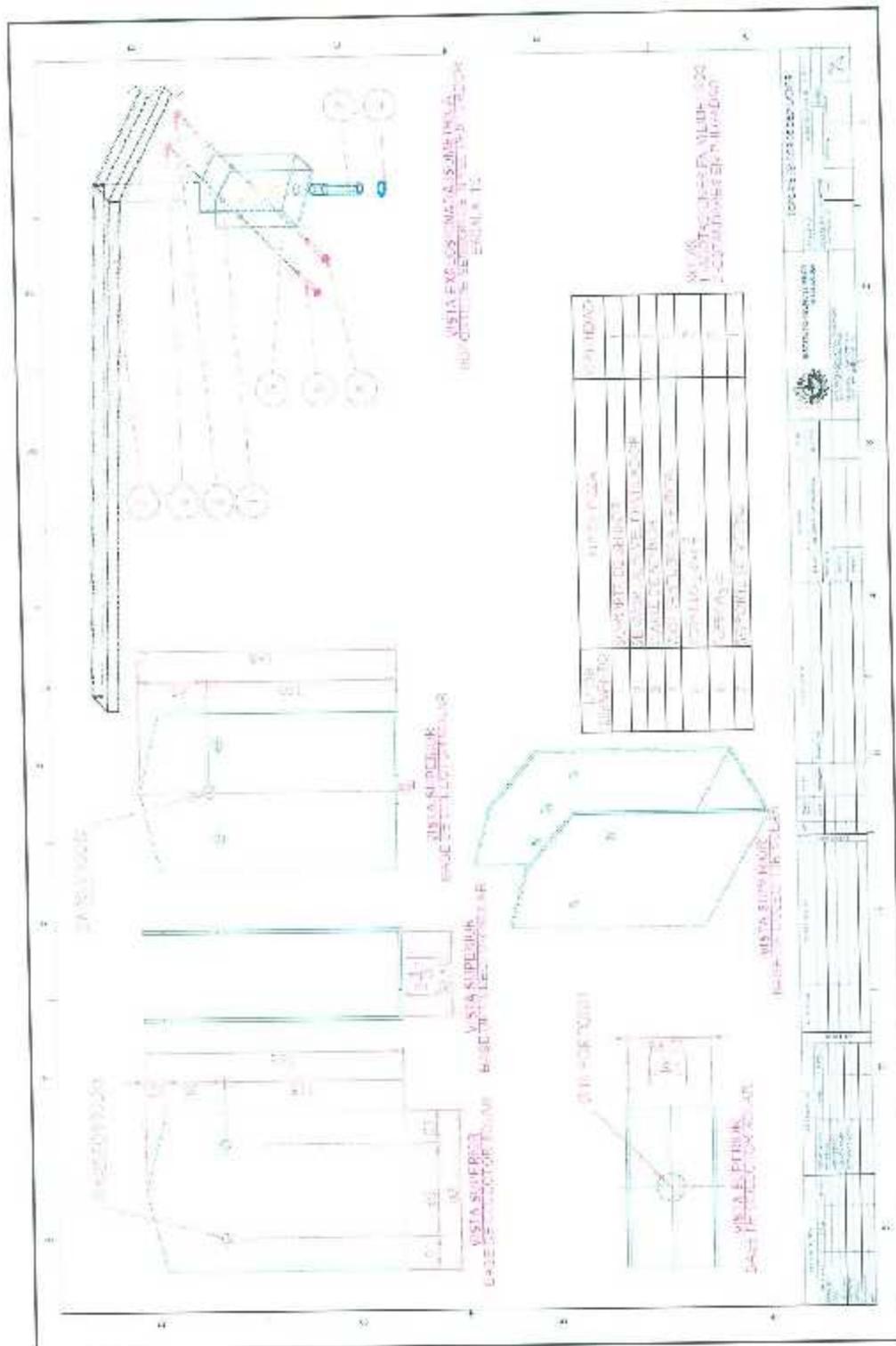
XXIII. Planodetalle tubería de agua residual (línea de purga).



XXIV. Ubicación de los elementos de instrumentación (sensores y actuadores).



XXV. Plano detalle de base para sensor de nivel de agua en charola destilador solar.



XXIX. Plano distribución de gabinetes eléctricos de control.

