



REPÚBLICA DEL ECUADOR

Escuela Politécnica Nacional

"E S C I E N T I A H O M I N I S S A L U S"

La versión digital de esta tesis está protegida por la Ley de Derechos de Autor del Ecuador.

Los derechos de autor han sido entregados a la "ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL" bajo el libre consentimiento del (los) autor(es).

Al consultar esta tesis deberá acatar con las disposiciones de la Ley y las siguientes condiciones de uso:

- Cualquier uso que haga de estos documentos o imágenes deben ser sólo para efectos de investigación o estudio académico, y usted no puede ponerlos a disposición de otra persona.
- Usted deberá reconocer el derecho del autor a ser identificado y citado como el autor de esta tesis.
- No se podrá obtener ningún beneficio comercial y las obras derivadas tienen que estar bajo los mismos términos de licencia que el trabajo original.

El Libre Acceso a la información, promueve el reconocimiento de la originalidad de las ideas de los demás, respetando las normas de presentación y de citación de autores con el fin de no incurrir en actos ilegítimos de copiar y hacer pasar como propias las creaciones de terceras personas.

Respeto hacia sí mismo y hacia los demás.

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS CON TRANSMISIÓN INALÁMBRICA, PARA EVALUAR EL RENDIMIENTO DE COLECTORES SOLARES TÉRMICOS PARA EL CALENTAMIENTO DE AGUA

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y CONTROL

JUAN GABRIEL ALMEIDA CEDEÑO
juanelojga@hotmail.com
PABLO MILTON CAMACHO FASSLER
pcfassler@hotmail.es

DIRECTOR: Fis. MARCO VINIVIO YÁNEZ SALCEDO, M.Sc.
marco.yanez@epn.edu.ec
CODIRECTOR: Dr. LUIS ANÍBAL CORRALES PAUCAR
luis.corrales@epn.edu.ec

Quito, julio 2011

DECLARACIÓN

Nosotros, JUAN GABRIEL ALMEIDA CEDEÑO y PABLO MILTON CAMACHO FASSLER declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Juan Gabriel Almeida Cedeño

Pablo Milton Camacho Fassler

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por JUAN GABRIEL ALMEIDA CEDEÑO y PABLO MILTON CAMACHO FASSLER bajo nuestra supervisión.

Fis. MARCO YÁNEZ, M.Sc.
DIRECTOR DEL PROYECTO

Dr. LUIS CORRALES
CODIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

A ACQUA CORPHITEC CIA. LTDA. por haber donado el equipo solar en el cual implementamos nuestro proyecto, también por el asesoramiento técnico en el área de sistemas solares y la instalación hidráulica del sistema.

Al Laboratorio de Energías Alternativas y Eficiencia Energética por permitirnos usar sus instalaciones y equipos durante el desarrollo de nuestra tesis.

Juan Almeida

AGRADECIMIENTO

A Dios por la oportunidad de crecer y ser siendo parte de la vida y de mantener en mi esa chispa que es mi Fe.

A mi mamá Magui y a toda mi familia por su total amor, entrega y constancia.

A la Escuela Politécnica Nacional por todo el conocimiento impartido.

Al Físico Marco Yáñez por sus acertadas recomendaciones en la dirección del proyecto.

Al Doctor Luis Corrales por su perspectiva siempre sabia, conciliadora y de incondicional apoyo.

A los integrantes del Laboratorio de Energías Alternativas y Eficiencia Energética y la Aqqua Corphitec Cia. Ltda. tanto por su conocimiento como su invaluable aporte.

A los amigos que eran, a los que son y los que seguirán por su motivación e ilimitado respaldo.

Pablo Camacho F.

DEDICATORIA

A mi familia Patricio, Alexandra, Ibeth, porque siempre han estado conmigo, dándome su amor y las fuerzas necesarias para seguir adelante. En especial a mis padres, que han dado todo por mí y mi hermana, gracias a ellos hemos podido educarnos y tener una vida feliz.

Juan Almeida

DEDICATORIA

Al amor infinito de la mente por la belleza de la sabiduría.

Pablo Camacho F.

CONTENIDO

INDICE DE TABLAS	xi
RESUMEN.....	xv
PRESENTACIÓN	xvii
1 CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO	1
1.1 ANTECEDENTES.....	1
1.2 INTRODUCCIÓN A LA RADIACIÓN SOLAR EN EL ECUADOR.....	1
1.2.1 CARACTERÍSTICAS DEL SOL.....	1
1.2.2 CLIMATOLOGÍA DE QUITO	7
1.3 TRANSFERENCIA DE CALOR	11
1.3.1 FORMAS FUNDAMENTALES DE TRANSFERENCIA DE CALOR	11
1.4 COLECTOR SOLAR TÉRMICO TERMOSIFÓN.....	23
1.4.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA	23
1.4.2 PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO.....	24
1.5 EFICIENCIA DE UN COLECTOR SOLAR TÉRMICO PLANO.....	26
1.5.1 DESCRIPCIÓN DEL CIRCUITO TÉRMICO	26
1.5.2 ANÁLISIS DE LAS PÉRDIDAS EN EL TANQUE Y EN LA TUBERIAS CONECTORAS	27
1.5.3 EFICIENCIA DEL SISTEMA.....	31
2 CAPÍTULO 2. DISEÑO DEL PROTOTIPO DEL SISTEMA ADQUISICION DE DATOS PARA UN COLECTOR TÉRMICO SOLAR.....	35
2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN	35
2.2 DISEÑO MECANICO.....	37
2.2.1 GABINETE METÁLICO	37
2.2.2 DISPOSITIVOS DE TUBERÍA Y GRIFERÍA PARA SENSORES.....	39
2.3 SUBSISTEMA DE ALIMENTACIÓN.....	42
2.3.1 FUENTE DE ALIMENTACIÓN ATX12V.....	42
2.3.2 ALIMENTACIÓN PARA CIRCUITO IMPRESOS	46
2.4 ACONDICIONAMIENTO DE SENSORES	48
2.4.1 SENSORES DE TEMPERATURA.....	48
2.4.2 SENSORES DE HUMEDAD.....	60
2.4.3 SENSOR DE RADIACIÓN.....	66
2.4.4 SENSOR DE CONDUCTIVIDAD.....	69
2.4.5 SENSORES DE FLUJO	88

2.5	SUBSISTEMA CENTRAL DE ADQUISICIÓN.....	93
2.5.1	MICROCONTROLADOR	95
2.5.2	RELOJ DS1307	98
2.5.3	MEMORIA 24LC1025.....	99
2.6	SUBSISTEMA DE VISUALIZACIÓN.....	101
2.6.1	MICROCONTROLADOR.....	102
2.6.2	LCD	103
2.6.3	MÓDULO SERIAL uMMC.....	104
2.7	SUBSISTEMA DE TRANSMISIÓN	106
3	CAPITULO 3. DESARROLLO DEL PROGRAMA DE CONTROL	108
3.1	PROGRAMA DE CONTROL	108
3.1.1	SUBROUTINA LEER TEMPERATURA Y RADIACIÓN	112
3.1.2	SUBROUTINA LEER FRECUENCIA.....	114
3.1.3	SUBROUTINA BURBUJA	117
3.1.4	SUBROUTINA LEER CONDUCTIVIDAD	118
3.1.5	SUBROUTINA LEER AMBIENTAL.....	119
3.1.6	INTERRUPCION USART0_RX.....	121
3.1.7	FORMATO DE ENVÍO DE DATOS.....	122
3.1.8	FORMATO DE ALMACENAMIENTO DE DATOS EN MEMORIA 24LC1025.....	123
3.2	PROGRAMA DE CONTROL DEL SUBSISTEMA DE VISUALIZACIÓN	125
3.2.1	INTERRUPCIONES.....	127
3.3	INTERFAZ HOMBRE-MÁQUINA (HMI)	129
3.3.1	LABVIEW	129
3.3.2	DESARROLLO DEL HMI.....	130
4	CAPITULO 4. PRUEBAS Y RESULTADOS.....	139
4.1	PRUEBAS DE SENSORES DE TEMPERATURA	139
4.1.1	PRUEBAS PARA LOS SENSORES FP7001A (T_1) Y SC4A (PT1000).....	139
4.1.2	PRUEBAS PARA TERMOCUPLAS ($T_2 - T_9$).....	141
4.1.3	PRUEBA PARA EL SENSOR SHT15.....	146
4.2	PRUEBAS DE LOS SENSORES HUMEDAD	148
4.2.1	OBTENCIÓN DE LAS CURVAS DE RESPUESTA.....	148
4.3	PRUEBAS DEL SENSOR DE RADIACIÓN 6450	150
4.3.1	OBTENCIÓN DE CURVA DE RESPUESTA.....	150
4.4	PRUEBAS DEL SENSOR DE CONDUCTIVIDAD SC4A	153
4.4.1	OBTENCIÓN DE LA CURVA DE RESPUESTA	153
4.5	PRUEBAS DE LOS SENSORES PARA MEDICION DE FLUJO.....	155

4.5.1	MEDICIÓN DE FLUJO DE REFERENCIA PARA SENSOR FP7001A.....	156
4.5.2	MEDICIÓN DEL FLUJO F_1	156
4.5.3	MEDICIÓN DE FLUJO DE REFERENCIA PARA SENSOR FP5600.....	157
4.5.4	MEDICIÓN DEL FLUJO F_2	157
4.6	PRUEBAS DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.....	158
4.6.1	EFICIENCIA DEL CAPTADOR SOLAR CON CUBIERTA	158
4.6.2	EFICIENCIA DEL SISTEMA SOLAR TERMOSIFÓN.....	163
5	CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	167
5.1	CONCLUSIONES.....	167
5.2	RECOMENDACIONES.....	172
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	174
	ANEXOS.....	171
	MANUAL DE USUARIO.....	219
	GLOSARIO DE TÉRMINOS	256

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Balance Energético de la Tierra	3
Tabla 1.2 Radiación que retorna al espacio	4
Tabla 1.3 Parámetros Meteorológicos de la Ciudad de Quito del año 2009	9
Tabla 1.4 Conductividad térmica de algunos materiales a temperatura ambiente.....	14
Tabla 1.5 Valores típicos del coeficiente de transferencia de calor por convección.	18
Tabla 1.6 Emisividad de algunos materiales a 300 [K]	19
Tabla 2.1 Distancias para montaje del sensor de Flujo FP7001A	39
Tabla 2.2 Requerimientos de alimentación AC de entrada	42
Tabla 2.3 Valores de voltaje DC de salida	44
Tabla 2.4 Valores de Rizado/Ruido del voltaje DC de salida.....	44
Tabla 2.5 Valores de sobrevoltajes de Voltaje de salida DC	45
Tabla 2.6 Voltajes de las placas de circuitos electrónicos impresos.....	46
Tabla 2.7 Nomenclatura de temperaturas	48
Tabla 2.8 Sensores de temperatura.....	49
Tabla 2.9 Características del circuito integrado 4052 y ADG509A	51
Tabla 2.10 Características del sensor de temperatura del FP7001A.....	51
Tabla 2.11 Características del sensor SHT15 para temperatura	58
Tabla 2.12 Sensores de Humedad.....	60
Tabla 2.13 Sensores de Humedad.....	62
Tabla 2.14 Características del sensor SHT15 para Humedad.....	63
Tabla 2.15 Características del Sensor de Radiación Solar 6450.....	66
Tabla 2.16 Notación del Sensor de Conductividad SC4A	69
Tabla 2.17 Especificaciones operativas del Sensor SC4A	69
Tabla 2.18 Características del Circuito Integrado XR2206	73
Tabla 2.19 Nomenclatura de Flujos	88
Tabla 2.20 Sensores de Flujo FP7001A y FP5600	88
Tabla 2.21 Especificaciones del Sensor de Flujo FP7001A	90
Tabla 2.22 Especificaciones del Sensor de Flujo FP5600.....	91
Tabla 2.23 Recursos del Microcontrolador.....	97
Tabla 2.24 Recursos del Microcontrolador del subsistema de Visualización.....	103
Tabla 2.25 Características del LCD JHD204A	104
Tabla 2.26 Características del Módulo Serial uMMC.....	105
Tabla 2.27 Características de los Módulos XBee-PRO 868	106
Tabla 3.1 Nomenclatura de variables.....	122
Tabla 4.1 Características del sensor de temperatura del Termo higrómetro DMA 672.....	146
Tabla 4.2 Características del sensor de Humedad del Termo higrómetro DMA 672	148
Tabla 4.3 Características del Radiómetro Global DPA 153.....	150
Tabla 4.4 Características del Conductivímetro Hach Sension7	153

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Factores que determinan la intensidad de la radiación	7
Figura 1.2 Tipos de Nubosidades.....	10
Figura 1.3 Flujo de calor a través de una pared	12
Figura 1.4 Transferencia de calor por convección desde una placa	16
Figura 1.5 Absorción de la radiación sobre una superficie opaca de absorptividad	20
Figura 1.6 Transferencia de calor por radiación entre superficies.....	21
Figura 1.7 Representación de un sistema de calentamiento por termosifón solar.....	23
Figura 1.8 Representación de un colector solar de placa plana.....	24
Figura 1.9 Circuito térmico del sistema.	26
Figura 1.10 Representación esquemática de las características de la placa absorbedora.....	28
Figura 1.11 Pérdidas de energía del sistema termosifón solar	30
Figura 1.12 Volumen de control del sistema	31
Figura 1.13 Volumen de control de un tanque.....	33
Figura 2.1 Diagrama de bloques del sistema de adquisición de datos.....	37
Figura 2.2 Gabinete metálico	38
Figura 2.3 Vista del dispositivo para montaje del sensor de Flujo FP7001A.	40
Figura 2.4 Distancias para montaje del sensor de Flujo FP5600	40
Figura 2.5 Vistas del dispositivo para montaje del sensor de Flujo FP5600.....	41
Figura 2.6 Vistas del dispositivo para montaje del sensor de Conductividad SC4A.	41
Figura 2.7 Diagramas circuitales de alimentación de circuitos electrónicos impresos.....	47
Figura 2.8 Diagrama de Bloques para adquisición de temperaturas.....	50
Figura 2.9 Diagrama circuital del circuito de acondicionamiento para el sensor FP7001A.....	52
Figura 2.10 Diagrama circuital para el acondicionamiento de las termocuplas tipo J.....	56
Figura 2.11 Diagrama circuital para el sensor SHT15	59
Figura 2.12 Diagrama de Bloques para adquisición de humedades	61
Figura 2.13 Curva de operación. Humedad vs Temperatura	62
Figura 2.14 Diagrama Circuital del Sensor HTF3223	63
Figura 2.15 Curva de operación del sensor SHT15 para Humedad	64
Figura 2.16 Diagrama de Bloques para adquisición de Radiación	67
Figura 2.17 Diagrama Circuital del Sensor de Radiación Solar 6050.....	68
Figura 2.18 Curva de Operación. Sensor de Conductividad SC4A	70
Figura 2.19 Rango de Conductividad del Sensor SC4A	71
Figura 2.20 Diagrama de bloques para acondicionamiento de conductividad.....	72
Figura 2.21 Diagrama circuital del Fabricante para generación de onda sinusoidal.....	73
Figura 2.22 Diagrama circuital diseñado para generación de onda sinusoidal.....	75
Figura 2.23 Diagrama circuital para amplificación de onda sinusoidal	76
Figura 2.24 Diagrama circuital para división de voltaje.....	77
Figura 2.25 Diagrama circuital convertidor AC-DC de valor absoluto medio.....	79
Figura 2.26 Formas de Onda del circuito de valor absoluto medio	80
Figura 2.27 Diagrama Circuital del circuito de valor absoluto medio.....	81
Figura 2.28 Filtro pasa bajos con una pendiente de -60dB/ década	82
Figura 2.29 Diagrama circuital del Filtro pasa bajos y amplificador no inversor	83
Figura 2.30 Diagrama circuital de acondicionamiento del sensor PT1000.....	86
Figura 2.31 Diagrama de bloques para adquisición de frecuencias de los sensores de flujo.	89
Figura 2.32 Diagrama circuital de acondicionamiento del sensor FP7001A.....	90
Figura 2.33 Diagrama circuital de acondicionamiento del sensor FP5600.....	92
Figura 2.34 Diagrama de bloques del subsistema de adquisición.....	93

Figura 2.35 Diagrama circuital del subsistema de adquisición.....	95
Figura 2.36 Microcontrolador ATMEGA 164PA	97
Figura 2.37 Mapa de Memoria del Reloj DS1307	99
Figura 2.38 Diagrama de pines del Reloj DS1307	99
Figura 2.39 Diagrama y descripción de pines de la memoria 24LC1025	100
Figura 2.40 Diagrama de bloques del subsistema de visualización	101
Figura 2.41 Diagrama circuital del subsistema de visualización	102
Figura 2.42 Distribución de pines del LCD JHD204A	104
Figura 2.43 Conexiones eléctricas del Módulo Serial uMMC y vista superior	105
Figura 2.44 Montajes de los módulos Xbee en las tarjetas de desarrollo.....	107
Figura 3.1 Diagrama de flujo del programa de control del subsistema de adquisición	110
Figura 3.2 Diagrama de Flujo de la subrutina de Leer temperatura y radiación	112
Figura 3.3 Diagrama de flujo de la subrutina de leer frecuencias.....	115
Figura 3.4 Diagrama de flujo de la subrutina de Burbuja	117
Figura 3.5 Diagrama de flujo de la subrutina de Leer conductividad.....	119
Figura 3.6 Diagrama de flujo de la subrutina Leer ambiental.....	120
Figura 3.7 Diagrama de flujo de subrutina USART0_RX	121
Figura 3.8 Diagrama de flujo de subrutina Grabar datos	124
Figura 3.9 Diagrama de flujo del programa de control del subsistema de visualización	126
Figura 3.10 Diagrama de flujo de subrutina USART1_RX	127
Figura 3.11 Diagrama de flujo de la subrutina INT2.....	128
Figura 3.12 Ventana de ingreso del usuario y contraseña.....	130
Figura 3.13 Ventana de Modificar usuario.....	131
Figura 3.14 Ventana de modificación de usuario con sesión iniciada	131
Figura 3.15 Ventana de configuración de comunicaciones.....	132
Figura 3.16 Ventana Principal del HMI	134
Figura 3.17 Ventana de adquirir datos noche.....	136
Figura 3.18 Ventana de crear reporte en Excel.....	138
Figura 4.1 Resultados obtenidos de mediciones de los sensores FP7001A y SC4A	140
Figura 4.2 Disposición de termocuplas.....	142
Figura 4.3 Resultados obtenidos de las termocuplas para las temperaturas de T_2 a T_6	143
Figura 4.4 Errores del integrado AD594.....	144
Figura 4.5 Resultados obtenidos de las termocuplas para las temperaturas de T_7 , T_8 , T_9	145
Figura 4.6 Disposición de sensores para medición de temperatura.....	147
Figura 4.7 Resultados obtenidos del sensor SHT15 para T_A	147
Figura 4.8 Disposición de sensores para medición de humedad	149
Figura 4.9 Resultados obtenidos de los sensores SHT15 y HTF 3223 (H_A y H_1)	149
Figura 4.10 Disposición de sensores de Radiación	151
Figura 4.11 Resultados obtenidos del sensor 6450 para radiación R_1	152
Figura 4.12 Disposición de sensores de Conductividad.....	154
Figura 4.13 Resultados obtenidos del sensor SC4A para Conductividad	154
Figura 4.14 Mediciones de radiación.....	158
Figura 4.15 Mediciones de temperatura T_3 y T_4	159
Figura 4.16 Mediciones de flujo másico de salida de agua del colector solar	160
Figura 4.17 Curva de potencia extraída del colector solar	161
Figura 4.18 Curva de eficiencia instantánea para una radiación de $1013,2 [W/m^2]$	162
Figura 4.19 Curva de radiación	163
Figura 4.20 Mediciones de temperatura T_2 y PT1000	164
Figura 4.21 Mediciones de temperatura T_3 , T_4 , T_5 y T_6	164
Figura 4.22 Curva de energía almacenada (Q) y energía solar total (EST).....	166
Figura 4.23 Curva de eficiencia del sistema solar termosifón	166

INDICE DE ABREVIATURAS

VARIABLE	DESCRIPCIÓN
M_{SOL}	Densidad total de flujo radiante por un cuerpo
σ	Constante de Stefan-Boltzman ($5,67 \times 10^{-8}$ [$Wm^{-2}K^{-4}$])
T	Temperatura
Q	Velocidad de conducción del calor
k	Conductividad térmica
α	Difusividad térmica
$\frac{dT}{dx}$	Gradiente de temperatura en la dirección de flujo del calor
h	coeficiente de transferencia de calor por convección
A	Área
ε	Emisividad
τ	Transmisividad térmica
ρ	Energía térmica reflejada
F_C	Eficiencia del colector
I	Radiación incidente
$\sum C_T$	Sumatorio de las capacidades térmicas de la placa y sus tubos, tuberías conectoras, tanque y la capacidad térmica del agua almacenada en ellos
$\sum U_s$	Sumatorio de los coeficientes de pérdidas del calor del sistema; hacia arriba y abajo del colector, por los tubos conectores y por el tanque

RESUMEN

Las estructuras de aprovechamiento térmico de la energía solar son requeridas debido a su innovación, ya que representan arreglos muy especiales y diferentes respecto a las instalaciones convencionales para el calentamiento de agua. Las instalaciones solares se deben realizar aplicando información recabada en la práctica y al mismo tiempo adoptando información y datos experimentales.

Los requerimientos para las nuevas construcciones son dirigidos para procurar el correcto funcionamiento de las instalaciones como una muestra de instalaciones energéticamente eficientes, confiables y seguras por lo que deben contemplar aspectos fundamentales que vayan en beneficio directo de los usuarios, el correcto funcionamiento de los sistemas y una nueva imagen de las bondades que encierra el uso de las energías renovables.

El colector térmico solar es una de las tecnologías solares más eficientes que se instalan típicamente en lugares fríos, puesto que presenta algunas ventajas, destacándose la total independencia de una energía pagada como sería con un suministro de energía eléctrica o combustible fósil.

Para encontrar la eficiencia requerida para estos sistemas de energías renovables se requieren la disposición de variables físicas para su tratamiento y su posterior estudio. Las diferentes medidas que son pretendidas para el cálculo de la eficiencia solían ser tomadas de manera manual pero el objetivo del presente proyecto de titulación es poder adquirir todas estos valores automáticamente y poderlos transmitir inalámbricamente.

El prototipo del sistema de adquisición de datos desarrolla una interfaz hombre-máquina para su manejo, una generación de reportes de los datos recolectados en Excel y un respaldo de la información en una memoria extraíble SD. La recolección

de las variables se la realizada cada minuto durante el día y cada 5 minutos durante la noche.

Las variables físicas recabas por el sistema son: temperatura, humedad, radiación, conductividad y flujo; las mismas que son recolectadas de forma análoga y digital de los subsistemas de acondicionamiento, a través del microcontrolador ATmega 164PA (características literal 2.5.1) del subsistema central de adquisición de tal manera que se distribuyen ordenadamente para el envío de los datos tanto a la interfaz hombre-máquina como al subsistema de visualización.

El monitoreo de los datos se realiza mediante una comunicación RS-232 al subsistema de transmisión, el mismo que se encarga mediante los módulos Xbee - PRO 868 la conectividad inalámbrica entre el sistema de adquisición remoto al computador del Laboratorio de Energías Alternativas y Eficiencia Energética.

El subsistema de visualización es el encargado de mostrar los datos localmente y también del almacenamiento de los mismos en la memoria SD. De manera similar este subsistema es controlado por el microcontrolador ATmega 164PA.

Los subsistemas restantes del sistema de adquisición son los tres de acondicionamiento que cumplen con el manejo de las termocuplas, sensores de conductividad, radiación, humedad y flujo. Algunos de estos sensores como son termocuplas, flujo y conductividad son montados en distintos puntos del sistema solar termosifón a través de varios dispositivos de tubería y plomería. Los sensores restantes de temperatura, humedad y radiación son sujetos directamente al gabinete metálico.

El gabinete metálico construido cumple con la norma IP-66 y satisface un diseño en el cual mantiene las placas de los circuitos electrónicos impresos seguros además de tener canaletas que llevan los cables tanto de los sensores a las borneras como de las borneras a la respectivos circuitos de acondicionamiento.

PRESENTACIÓN

El presente proyecto está dividido en cinco capítulos los cuales son: marco teórico, diseño del prototipo del sistema de adquisición de datos para un colector térmico solar, desarrollo del programa de control, pruebas y resultados y el capítulo de conclusiones y recomendaciones.

El primer capítulo detalla tres partes donde abarca una introducción a la radiación solar en el Ecuador, una descripción de las formas de transferencia de calor y finalmente la aplicación de la transferencia de calor en una descripción del colector solar térmico termosifón y su eficiencia.

En la introducción a la radiación solar en el Ecuador se determina varias características de sol y de su influencia sobre nuestra región conllevando a las particularidades de la climatología en la ciudad de Quito donde va ser monitoreado el sistema solar termosifón solar con el prototipo diseñado en este proyecto. Continuando con el marco teórico se encuentra con el tópico de la transferencia de calor donde se aclara las formas fundamentales de transferencia detallando sus características y propiedades tanto para la conducción, convección y radiación. Para finalizar este capítulo se aborda la descripción de un colector térmico plano donde se describe su funcionamiento, ventajas y desventajas. Además incluye el análisis de eficiencia del mismo por lo que se particulariza un circuito térmico, y el análisis de las pérdidas del sistema.

En el segundo capítulo se realiza una descripción general de todo el sistema en los componentes de hardware por lo que se desarrolla el diseño y la implementación de los diferentes subsistemas en los respectivos circuitos impresos, montaje de los sensores en el colector térmico y presentación de los sensores utilizados. Adicionalmente se indica la parte mecánica con respecto al gabinete metálico, dispositivos de tubería y plomería para montaje de algunos transductores. Los subsistemas de alimentación, acondicionamiento, central de adquisición,

visualización y transmisión son parte del sistema total de adquisición de datos en los cuales se detallan sus componentes y las funciones que cumplen cada dispositivo.

En el tercer capítulo se detalla el programa de control de los microcontroladores del subsistema de central de adquisición y subsistema de visualización como también de la interfaz para el computador. El lenguaje para la programación de los microcontroladores se realizó en la plataforma de BASCOM V1.11.9.5 de AVR. Para el programa cargado en el ATmega 164PA del subsistema central de adquisición se lo divide las acciones principales que son: configuración de periféricos y variables, inicialización, lectura del reloj DS1307, subrutinas de adquisición para el día y para la noche y finalmente las interrupciones. Mientras que para el microcontrolador del subsistema de visualización se tiene las acciones de configuración de periféricos y variables, muestra de las variables adquiridas, activación y desactivación de visualización e interrupciones. Para la interfaz hombre – máquina la plataforma utilizada es LABView 2009 donde a partir de la misma se sincroniza el reloj DS1307 de la adquisición y se monitorea el sistema, además de permitir al usuario el tratamiento de los datos que son generados en un archivo de Excel tanto de los datos adquiridos durante el día cuando el computador esta encendido como de la memoria cuando almacena los datos por la noche.

En el cuarto capítulo se desarrollan las diferentes pruebas para los sensores utilizados, con el objetivo de determinar su funcionamiento óptimo y el margen de error cometido en contraste a los equipos y sensores que sirven de referencia. Además en este capítulo se realiza la prueba general del sistema de adquisición de datos en función de la eficiencia obtenida del colector o captador térmico con cubierta y el sistema termosifón.

En el quinto capítulo se especifica las conclusiones y las recomendaciones donde se toma en cuenta tanto las dificultades presentadas en la elaboración del proyecto como también del capítulo de pruebas y resultados.

Finalmente se adjunta un manual de usuario para el sistema de adquisición de datos, el diseño electrónico de los circuitos impresos y los planos de la estructura.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO

1.1 ANTECEDENTES

Ante la propuesta de implementar sistemas de energías renovables eficientes como es el caso de colectores solares térmicos para el calentamiento de agua de uso sanitario en domicilios, se requiere obtener datos que permitan evaluar el rendimiento de estos sistemas. Se presenta la necesidad de contar con sistemas automatizados de monitoreo por lo que el Laboratorio de Energías Alternativas y Eficiencia Energética de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional y la Empresa Aqqua Corphitec Cia. Ltda. planteó y auspició el presente trabajo.

Por otra parte se pretende desarrollar una base teórica en la que se puede denotar algunas características de este sistema específico, aportando soluciones térmicas para el sector industrial energético ecuatoriano. A continuación se presenta tanto los fundamentos de la radiación solar como las formas específicas de transferencia de calor y eficiencia que se presenta en el colector térmico solar.

1.2 INTRODUCCIÓN A LA RADIACIÓN SOLAR EN EL ECUADOR

1.2.1 CARACTERÍSTICAS DEL SOL

El Sol es el cuerpo celeste de mayor dimensión del Sistema Solar considerado como una estrella del tipo espectral G2, con una masa equivalente al 99% de la masa total del Sistema Solar siendo esta de 2×10^{30} [kg]. La fotosfera o superficie solar posee una temperatura en torno a los 5 780 [°K], siendo en su interior mucho más caliente con una temperatura alrededor de 15,6 millones [°K]. Dos átomos de hidrógeno se fusionan con un átomo de helio y la diferencia de masa se convierte en energía generando calor y luz. La distancia media entre el Sol y la Tierra es de $149,6 \times 10^6$ [km]. (1,31,23)

El Sol es una esfera enorme de gas caliente con un diámetro de 1 400 000 [km], que se encuentra en un estado ni líquido ni gaseoso denominado plasma, que está conformado de un 75 [%] de hidrógeno, un 20 [%] de helio y el 5 [%] de oxígeno, carbono, hierro y otros elementos.

El Sol está sometido a un movimiento de traslación alrededor del centro de la galaxia, a una velocidad de 216 [km/s], además el Sol no rota de forma rígida sino que en las regiones ecuatoriales rota más rápido con un periodo de 24 días y en los polos completa una rotación en 30 días.

La densidad del Sol es menor a la terrestre siendo de 1,41 [g/cm³], aunque su masa es 3 344 veces superior, lo que supone una fuerza de la gravedad 28 veces más elevada de 274 [m/s²]. (1)(31)(32)

1.2.1.1 RADIACIÓN SOLAR

La radiación solar es el conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el Sol debido a su actividad termo nuclear y emite aproximadamente una radiación de 4×10^{33} [E/s].

El Sol se comporta prácticamente como un cuerpo negro que emite energía siguiendo la ley de Planck a una temperatura de 5 780 [K]. La parte visible de la radiación solar se distribuye mayoritariamente desde el infrarrojo hasta el ultravioleta. No toda la radiación alcanza la superficie de la Tierra, porque las ondas ultravioletas más cortas, son absorbidas por los gases de la atmósfera fundamentalmente por el ozono.

Aproximadamente el 40 [%] de la radiación solar que recibe la Tierra, comprendida entre 400 [nm] y 700 [nm], pueden ser detectadas por el ojo humano, constituyendo lo que conocemos como luz visible. Del otro 50 [%], la mayoría se sitúa en la parte infrarroja del espectro y un 7 [%] aproximadamente pertenece a la radiación ultravioleta con longitud de onda de 100 [nm] a 400 [nm] donde la porción de esta radiación, que no es absorbida por la atmósfera, es la que produce quemaduras en la piel a las personas que se expone muchas horas al sol sin protección (1)(34)(35)(36).

La radiación infrarroja de más de 760 [nm], es la que corresponde a longitudes de onda más largas y lleva poca energía asociada. Su efecto aumenta la agitación de las moléculas, provocando el aumento de la temperatura. El CO₂, el vapor de agua y las pequeñas gotas de agua que forman las nubes absorben con mucha intensidad las radiaciones infrarrojas (1)(34)(35)(36).

A continuación se encuentra la **Tabla 1.1** que representa los valores de radiación en el balance energético de la Tierra:

Tabla 1.1 Balance Energético de la Tierra

Radiación reflejada	Porcentaje
Por la atmósfera	6 [%]
Por las nubes	20 [%]
Por la superficie terrestre	4 [%]
Radiación absorbida	Porcentaje
Por los continentes y océanos	51 [%]
Por la atmósfera	16 [%]
Por las nubes	3 [%]
Total	100 [%]

Fuente: Porcentajes tomados del ciclo energético de la Tierra proporcionados por la NASA (11)

En la **Tabla 1.1** se observa como se distribuye el 100% de la energía proveniente del sol, un 30 [%] de retorna al espacio exterior, de forma directa o indirecta. Un 19 [%] de la energía es absorbida por la atmósfera, nubes, ozono y otros gases, mientras que la Tierra recibe un 51 [%], esta distribución de la energía hace posible el balance energético en la Tierra.

También se presenta la **Tabla 1.2** que muestra la radiación que retorna al espacio exterior.

Tabla 1.2 Radiación que retorna al espacio

Radiación retornada	Porcentaje
Por la radiación reflejada	30 [%]
Por el aire ascendente y conducción	7 [%]
Por el calor latente del vapor de agua	23 [%]
Por la Tierra radiada directamente	6 [%]
Por la atmósfera	1 [%]
Por la nubes	3 [%]
Total	70 [%]

Fuente: Porcentajes tomados del ciclo energético de la Tierra proporcionados por la NASA (11)

En la **Tabla 1.2** se distribuye el 70 [%] de la energía devuelta al espacio exterior donde como se mencionó anteriormente un 30 [%] de retorna debido a la atmosfera, nubes y superficie terrestre. Un 23 [%] de la energía es devuelta a la atmosfera y a las nubes debido por el calor latente del vapor de agua. El restante 17 [%] atmosfera se comparte entre el aire, la atmosfera y las nubes. Cabe destacar que solo el 1 [%] del 16 [%] de la radiación absorbida por la atmósfera es llevada a la estratósfera.

1.2.1.2 CONSTANTE SOLAR

Calculando la radiación emitida por el sol usando la Ley de Stefan-Boltzman se tiene que:

$$M_{SOL} = \sigma * T^4 \quad (1.1)$$

Dónde:

M_{SOL} = Densidad total de flujo radiante por un cuerpo en [W/m²]

σ = Constante de Stefan-Boltzman (5,67 x 10⁻⁸ [Wm⁻²K⁻⁴])

T = Temperatura del cuerpo en grados Kelvin [K]

Por lo que:

$$M_{SOL} = 5,67 \times 10^{-8} [Wm^{-2} \circ K^{-4}] * (5780)^4 [^{\circ}K^4]$$

$$M_{SOL} = 63,28 [MWm^{-2}]$$

Como la cantidad total de radiación en la superficie del sol debe ser igual a la radiación en la órbita de la tierra entonces:

$$M_{SOL} \times A_{SOL} = M_{TIERRA} * A_{TIERRA} \quad (1.2)$$

$$M_{SOL} \times \pi r_{SOL}^2 = M_{TIERRA} * \pi r_{SOL-TIERRA}^2$$

$$M_{TIERRA} = \frac{M_{SOL} \times \pi r_{SOL}^2}{\pi r_{SOL-TIERRA}^2} \quad (1.3)$$

Reemplazando valores:

$$M_{TIERRA} = \frac{63,28 [MWm^{-2}] \times (695,5 \times 10^6)^2 [m^2]}{(149,6 \times 10^6)^2 [m^2]}$$

$$M_{TIERRA} = 1367 [Wm^{-2}]$$

Este valor se conoce como la constante solar y se usa en cálculos de radiación solar para sistemas fotovoltaicos y termosolares (1).

1.2.1.3 RADIACION SOLAR EN QUITO (37)

En la transmisión de la radiación se debe tomar en cuenta que existen factores geográficos y ambientales para la ciudad que modifican la intensidad de la radiación y por lo tanto pueden modificar la cantidad de la misma que llega a la tierra. Estos factores que influyen son:

- **Hora Solar:** La radiación es mayor al medio día, entre las 12 y 15 horas (dependerá de la hora solar de la región, en Ecuador es 12h45), pero si el cielo se encuentra nublado, sólo disminuye en un 10 [%] su transmisión.

- **Altitud:** Quito por ser una ciudad que se encuentra a 2 800 metros sobre el nivel del mar, tiene mayor porcentaje de radiación que en la playa, con un aumento de las quemaduras solares en un 5-10 [%]. Cada 330 [m] aumenta la radiación 6-10 [%] para el caso de radiación UV (Ultra Violeta).
- **Latitud geográfica:** La radiación es mayor por estar en el centro del mundo, por ende en días nublados disminuirá en poca cantidad, tomando en cuenta que la mayor parte del año, muchas ciudades del Ecuador pasan con cielo cubierto de nubes (8).
- **Angulo de incidencia de los rayos solares:** Dependerá del ángulo de incidencia de la radiación solar con respecto a la superficie.
- **Estado atmosférico:** La contaminación del aire protege de la radiación solar a las personas, pero simultáneamente se va deteriorando la capa de ozono y a la larga disminuye la misma y por más contaminación o por más nubes que exista en la atmósfera, siguen filtrando rayos solares. El ozono troposférico y las partículas que sustentan el aire pueden bloquear los rayos UV. En cielos plenamente cubiertos de nubes hay disminución de la irradiación UV que llega a la superficie, pero el efecto de nubes aisladas o dispersas puede incrementar los niveles de UV localizados si está presente la luz del sol por efecto de la dispersión.
- **Superficies reflectantes:** Aun si está nublado, la radiación se refleja en la nieve, superficies de aguas planas, y en menor medida, la arena, la hierba y las superficies de agua onduladas pueden llevar a aumentos muy grandes de exposición.

A continuación se presenta la **Figura 1.1** que muestran los factores mencionados:

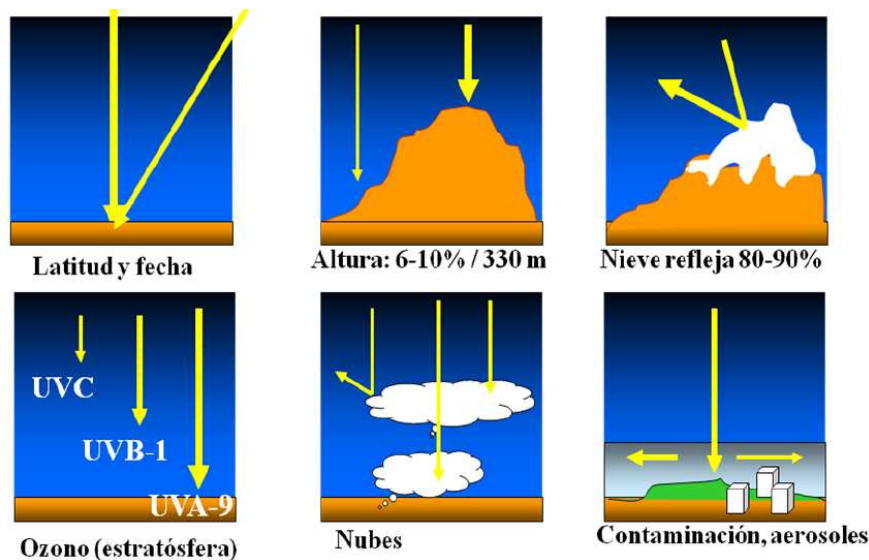


Figura 1.1 Factores que determinan la intensidad de la radiación (37)

1.2.2 CLIMATOLOGÍA DE QUITO (38)

El clima de la ciudad de Quito corresponde al clima templado de montaña, con un período de lluvias prolongado y una estación seca de cuatro meses, la temperatura anual promedio es de 15 [°C]. El clima en los Andes cambia según la altitud y el tiempo del año. En Quito la temperatura varía entre 7 [°C] en la noche, 24 [°C] al medio día.

Aunque sea contradictorio, el clima de Quito no es mitad seco y lluvioso siendo una de las principales características del clima de la ciudad, la corta duración de la estación seca, correspondiente al período de invierno austral y al verano en el hemisferio norte (durante los meses de junio a septiembre), en la cual las precipitaciones no superan los 70 [mm] de lluvia en promedio, siendo julio y agosto los meses más áridos con 20 [mm].

El resto del año, en la temporada de lluvias (conocida como invierno) los índices promedian los 123 [mm], teniendo a los meses de marzo (150 [mm]) y abril (170 [mm]) como los más húmedos. Las lluvias se presentan aproximadamente en una medida promedio anual de 554 [mm].

A pesar de sus 2 800 metros sobre el nivel del mar, Quito cuenta con un clima primaveral la mayor parte del año, por estar ubicada cerca de la mitad del mundo. De junio a septiembre el clima suele ser más cálido, sobre todo durante el día, mientras que el resto del año el clima suele ser más frío. En esta época del año las montañas y cerros que rodean la ciudad se cubren de nieve y son más frecuentes las granizadas.

En enero de 2006 la temperatura quiteña alcanzó los - 2 [°C] debido a los diferentes fenómenos provocados por el cambio climático.

A continuación se presenta en la **Tabla 1.3** los principales parámetros meteorológicos característicos de la ciudad obtenida a partir de los datos recopilados por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología.

De la **Tabla 1.3** se obtiene que los meses con una mayor precipitación son Enero, Febrero y Abril con valores superiores a los 140 [mm³] mientras que los meses de mayor radiación promedio son los meses de Abril, Julio y Agosto con valores superiores a 400 [W/m²].

Tabla 1.3 Parámetros Meteorológicos de la Ciudad de Quito del año 2009

<i>Meses</i>	Velocidad del viento [m/s]			Temperatura [°C]			Humedad Relativa [%]			Radiación [W/m ²]			Energía disponible [MJ/ mes*m ²]	Precipitación [mm ³]
	Mín	Máx	Prom	Mín	Máx	Prom	Mín	Máx	Prom	Mín	Máx	Prom	Total	Total
Enero	0	5,2	0,80	8,5	19,6	12,40	45,9	100,0	87,80	0	1093	338,1	196,52	165,8
Febrero	0	5,1	0,84	6,9	21,0	12,53	39,2	99,7	86,60	0	1216	328,7	400,03	141,5
Marzo	0	6,9	0,96	7,8	21,7	12,79	31,9	99,5	86,23	0	1154	359,8	488,34	0,0
Abril	0	5,4	1,03	8,3	21,1	12,92	33,5	100,0	81,64	0	1250	400,0	699,97	161,3
Mayo	0	5,2	1,06	7,2	21,3	13,12	19,6	99,3	79,39	0	1248	347,1	475,25	0,0
Junio	0	6,8	1,25	7,4	20,6	13,26	36,8	99,3	75,47	0	1063	331,7	434,68	3,05
Julio	0	6,4	1,53	7,6	21,1	13,49	24,5	98,9	64,11	0	1134	432,3	447,46	2,6
Agosto	0	6,1	1,57	7,6	20,7	13,81	27,7	98,9	65,56	0	1136	393,9	534,77	1,0
Septiembre	0	6,6	1,8	6,9	22,4	14,15	16,2	98,6	56,82	0	1227	468,9	616,15	7,4
Octubre	0	6,3	1,19	8	22,2	13,48	12,7	99,6	75,23	0	1236	370,9	517,47	69,4
Noviembre	0	5,0	1,04	6,7	20,4	13,08	12,0	99,4	75,57	0	1108	389,7	575,60	71,3
Diciembre	0	5,3	1,10	12,9	23,5	10,29	57,0	87,0	74,58	0	1278	401,5	415,11	120,0

Fuente: Datos proporcionados por INAMHI de la Estación Meteorológica del sector de Iñaquito

1.2.2.1 NUBOSIDADES EN LA CIUDAD DE QUITO

El cielo de la ciudad de Quito se caracteriza por tres nubosidades que son: cúmulos, estratos, cúmulonimbos, que se muestran a continuación en la **Figura 1.2:**

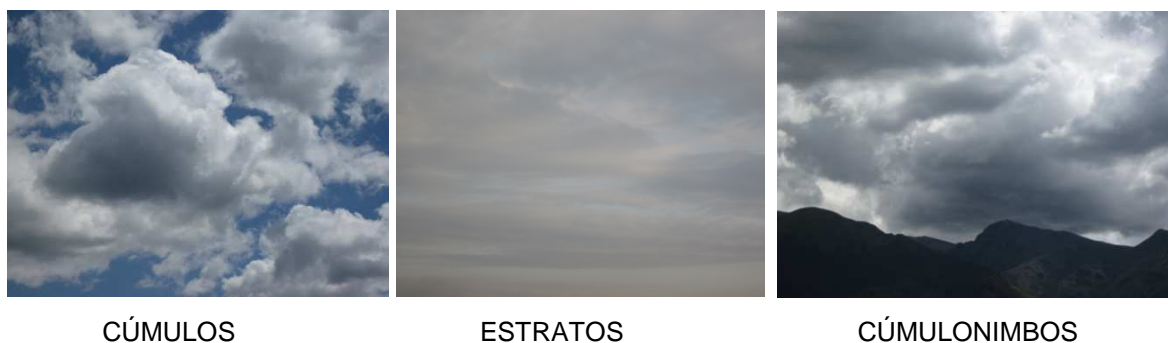


Figura 1.2 Tipos de Nubosidades

La cantidad de irradiancia bajo condiciones de nubosidad parcial tipo cúmulos, o total tipo cumulonimbos, en un ambiente de altura como Quito, ha demostrado que se alcanzan incrementos extremos de radiación y que los mismos pueden permanecer durante extensos periodos de tiempo. Dado que altos porcentajes de nubosidad son muy frecuentes en esta ciudad, este fenómeno puede desempeñar un rol particularmente importante en el balance de radiación (38).

En resumen de la introducción a la radiación solar en el Ecuador, se dispone al Sol como el principal generador de energía, que a través de su radiación producida de 4×10^{33} [E/s] llega al planeta Tierra y se distribuye de distintas maneras, por lo que mayoritariamente recibe un 26 [%] de forma directa, y la radiación en si absorbida por la atmosfera, nubes y ozono es del 19 [%], distribuyéndose el resto de la radiación en la superficie terrestre. Se caracteriza también el aspecto climatológico y geográfico del lugar al que se encuentre, en este caso de la ciudad de Quito donde entre las 12 y 15 horas se tendrá los mayores picos de radiación, debido a su altitud existe mayor porcentaje de rayos ultravioleta denotándose un aumento del 6 [%] al 10 [%] por cada 330 [m] de altitud. Finalmente la temperatura promedio anual de la ciudad es de 15 [°C] y precipitación de 554 [mm] (37).

1.3 TRANSFERENCIA DE CALOR

1.3.1 FORMAS FUNDAMENTALES DE TRANSFERENCIA DE CALOR

1.3.1.1 INTRODUCCIÓN

La transferencia de calor es la ciencia que trata de predecir el intercambio de energía que puede tener lugar entre cuerpos materiales, como resultado de una diferencia de temperatura. La ciencia de la transferencia de calor pretende no sólo explicar cómo la energía térmica puede ser transferida, sino también predecir la rapidez con la que bajo ciertas condiciones específicas, tendrá lugar esa transferencia. La transferencia de calor se detiene cuando los dos cuerpos materiales alcanzan la misma temperatura.

El calor se puede transferir de tres modos diferentes: conducción, convección y radiación. Todos los modos de transferencia de calor requieren de la existencia de una diferencia de temperatura y todos ellos ocurren del medio que tiene la temperatura más elevada hacia uno de temperatura más baja (3).

1.3.1.2 CONDUCCIÓN

La conducción es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de interacciones entre esas partículas. La conducción puede tener lugar en los sólidos, líquidos o gases. En los gases y líquidos la conducción se debe a las colisiones y la difusión de las moléculas durante su movimiento aleatorio. En los sólidos se debe a la combinación de las vibraciones de las moléculas en una red y al transporte de energía por parte de los electrones libres. Por ejemplo, llegara el momento en que una bebida fría en un cuarto cálido se caliente hasta la temperatura ambiente como resultado de la transferencia de calor por conducción, del cuarto hacia la bebida, a través del aluminio.

La velocidad de conducción de calor a través de un medio depende de la configuración geométrica de este, su espesor y el material de que este hecho, así como la diferencia de temperatura a través de él.

Se sabe que al envolver un tanque de agua caliente con un material aislante se reduce la velocidad de la pérdida de calor de ese tanque. Entre más grueso sea el aislamiento, menor será la pérdida de calor. También se conoce que un tanque de agua caliente perderá calor a mayor velocidad cuando se baja la temperatura del cuarto en donde se aloja. Además, entre más grande sea el tanque, mayor será el área superficial y, por consiguiente, la velocidad de pérdida de calor (3).

Considere una conducción de estado estacionario de calor a través de una pared plana grande de espesor $\Delta x = L$ y área A , como se muestra en la **Figura 1.3**.

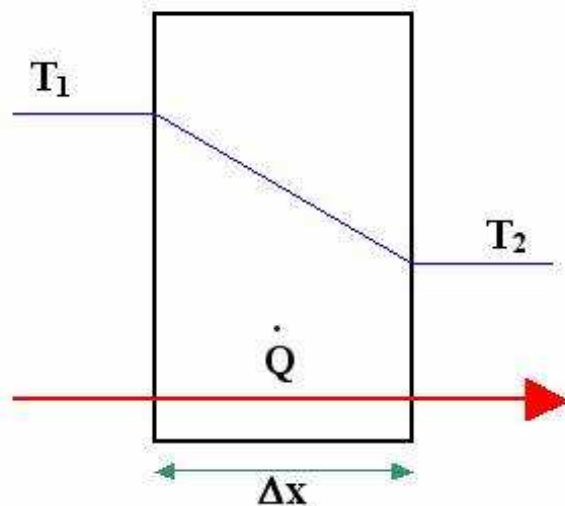


Figura 1.3 Flujo de calor a través de una pared (3)

La diferencia de temperatura de uno a otro lado de la pared es $\Delta T = T_2 - T_1$. Los experimentos han demostrado que la velocidad de transferencia de calor (\dot{Q}), a través de la pared se duplica cuando se duplica la diferencia de temperatura ΔT de uno a otro lado de ella, o bien, se duplica el área A perpendicular a la dirección de transferencia de calor, pero se reduce a la mitad cuando se duplica el espesor L de la pared. Por tanto se concluye, que la velocidad de conducción de calor a través de una capa plana es proporcional a la diferencia de temperatura de esta y el área de transferencia de calor y es inversamente proporcional al espesor de esta capa, es decir:

Velocidad de la conducción de calor $\propto \frac{(\text{Área})(\text{Diferencia de temperatura})}{\text{Espesor}}$

O bien:

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = kA \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} [W] \quad (1.4)$$

En donde la constante de proporcionalidad k es la conductividad térmica del material, que es una medida de la capacidad de un material para conducir calor, como se observa en la **Tabla 1.4**.

En el caso límite de $\Delta x \rightarrow 0$, la ecuación que acaba de darse se reduce a la forma diferencial:

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = -kA \frac{dT}{dx} [W] \quad (1.5)$$

A esta ecuación se la conoce como la Ley de Fourier de la Conducción de Calor. Aquí, $\frac{dT}{dx}$ es el gradiente de temperatura en la dirección de flujo del calor. La relación antes dada indica que la velocidad de conducción de calor en una dirección es proporcional al gradiente de temperatura en esta dirección. El calor es conducido en la dirección de la temperatura decreciente y el gradiente de temperatura se vuelve negativo cuando esta última decrece al crecer x . El signo negativo en la **Ecuación (1.2)** garantiza que la transferencia de calor en la dirección x positiva sea una cantidad positiva.

El área A de transferencia de calor siempre es perpendicular a la dirección de esa transferencia (3).

1.3.1.2.1 Conductividad Térmica

La conductividad térmica de un material se puede definir como la velocidad de transferencia de calor a través de un espesor unitario de un material por unidad de área por unidad de diferencia de temperatura. La conductividad térmica de un material es la medida de la capacidad del mismo para conducir calor. Un valor

elevado para la conductividad térmica indica que el material es un buen conductor del calor y un bajo valor indica que es un mal conductor o que es un aislante. (3) En la **Tabla 1.4** se dan las conductividades térmicas de algunos materiales comunes a temperatura ambiente.

Tabla 1.4 Conductividad térmica de algunos materiales a temperatura ambiente.

Material	Conductividad Térmica $\left[\frac{W}{m \cdot ^\circ C}\right]$
Diamante	2300
Plata	429
Cobre	401
Oro	317
Aluminio	237
Hierro	80,2
Vidrio	0,78
Agua	0,613
Aire	0,026

Fuente: Tomado del libro Transferencia de Calor de Cengel Yunus (3)

Se puede calentar una capa de material de espesor y área conocidos, desde uno de sus lados, por medio de un calentador de resistencia eléctrica de potencia conocida. Si las superficies exteriores del calentador están bien aisladas, todo el calor generado por la resistencia se transferirá a través del material cuya conductividad se va a determinar. Entonces, midiendo las dos temperaturas de las superficies del material cuando se llega al estado estacionario de la transferencia y sustituyéndolas en la **Ecuación (1.5)** junto con otras cantidades conocidas se obtiene la conductividad térmica.

El mecanismo de conducción de calor en un líquido se complica por el hecho de que las moléculas están más cercanas entre si y ejercen un campo de fuerzas intermoleculares más intenso. Normalmente la conductividad térmica de una sustancia alcanza su valor máximo en la fase sólida y el mínimo en la fase gaseosa. A diferencia de los gases, las conductividades térmicas de la mayor

parte de los líquidos decrecen al incrementarse la temperatura, constituyendo el agua una notable excepción. Los metales líquidos como el mercurio y el sodio presentan conductividades térmicas elevadas y resultan muy apropiados para usarse cuando se desea una gran velocidad de transferencia de calor hacia un líquido, como en las plantas nucleares de generación eléctrica (3).

Las conductividades térmicas de los materiales varían con la temperatura. La variación de la conductividad térmica sobre ciertos rangos de temperatura es despreciable para algunos materiales, pero significativa para otros. Las conductividades térmicas de ciertos sólidos exhiben incrementos sorprendentes a temperaturas cercanas al cero absoluto, cuando estos sólidos se convierten en superconductores.

La dependencia con respecto a la temperatura de la conductividad térmica causa complejidad considerable en el análisis de la conducción. Por lo tanto, es práctica común evaluar la conductividad térmica k a la temperatura promedio y tratarla como constante en los cálculos.

En el análisis de la transferencia de calor normalmente se supone que un material es isotrópico; es decir, tiene propiedades uniformes en todas direcciones. Esta suposición es realista para la mayor parte de los materiales, excepto para aquellos que exhiben características estructurales diferentes en direcciones diferentes, como los materiales compuestos laminados y la madera (3).

1.3.1.2.2 Difusividad térmica

Otra propiedad de los materiales que aparece en el análisis de la conducción de calor en régimen transitorio es la difusividad térmica, la cual representa cuán rápido se difunde el calor por un material y se define como:

$$\alpha = \frac{\text{Calor conducido}}{\text{Calor almacenado}} = \frac{k}{\rho C_p} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right] \quad (1.7)$$

La conductividad térmica k representa lo bien que un material conduce el calor y la capacidad calorífica ρC_p representa cuanta energía almacena un material por unidad de volumen. Por tanto, la difusividad térmica de un material se puede

concebir como la razón entre el calor conducido a través del material y el calor almacenado por unidad de volumen. Un material que tiene una alta conductividad térmica o una baja capacidad calorífica tiene una gran difusividad térmica. Entre mayor sea la difusividad térmica, más rápida es la propagación del calor hacia el medio. Un valor pequeño de la difusividad térmica significa que, en su mayor parte, el calor es absorbido por el material y una pequeña cantidad de ese calor será conducido. (3)

1.3.1.3 CONVECCIÓN

La convección es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacentes que están en movimiento y comprende los efectos combinados de la conducción y el movimiento de fluidos. Entre más rápido es el movimiento de un fluido, mayor es la transferencia de calor por convección. En ausencia de cualquier movimiento masivo de fluido, la transferencia de calor entre una superficie sólida y el fluido adyacente es por conducción pura. La presencia de movimiento masivo del fluido acrecienta la transferencia de calor entre la superficie sólida y el fluido, pero también complica la determinación de las velocidades de esa transferencia (3).

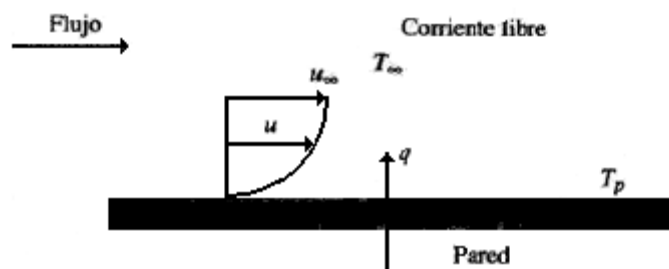


Figura 1.4 Transferencia de calor por convección desde una placa. (2)

Considere el enfriamiento de un bloque caliente al soplar aire frío sobre su superficie superior (**Figura 1.4**). La energía se transfiere primero a la capa de aire adyacente al bloque, por conducción. Enseguida, esta energía es acarreada alejándola de la superficie, por convección; es decir, por los efectos combinados de la conducción dentro del aire que se debe al movimiento aleatorio de moléculas de este, y del movimiento masivo o macroscópico de ese aire que remueve el aire calentado cercano a la superficie y lo reemplaza por otro más frío.

La convección libre o natural ocurre cuando el movimiento del fluido no se complementa por agitación mecánica. Pero cuando el fluido se agita mecánicamente, el calor se transfiere por convección forzada. La agitación mecánica puede aplicarse por medio de un agitador, aun cuando en muchas aplicaciones de proceso se induce circulando los fluidos calientes y fríos a velocidades considerables en lados opuestos de tubos (2).

Las convecciones libre y forzada ocurren a diferentes velocidades, la última es la más rápida y por lo tanto, la más común. Los factores que promueven altas transferencias para la convección forzada, no necesariamente tienen el mismo efecto en la convección libre (2).

Los procesos de transferencia de calor que comprenden cambio de fase de un fluido también se consideran como convección a causa del movimiento de ese fluido inducido durante el proceso, como la elevación de las burbujas de vapor durante la ebullición o la caída de las gotas de líquido durante la condensación.

A pesar de la complejidad de la convección, se observa que la rapidez de la transferencia de calor por convección es proporcional a la diferencia de temperatura y se expresa en forma conveniente por la ley de Newton del enfriamiento como:

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s(T_s - T_{\infty}) [W] \quad (1.8)$$

En donde h es el coeficiente de transferencia de calor por convección, en $[\frac{W}{m^2} \cdot ^\circ C]$, A_s es el área superficial a través de la cual tiene lugar la transferencia de calor por convección, T_s es la temperatura de la superficie y T_{∞} es la temperatura del fluido suficientemente alejado de esta superficie. Se nota que en la superficie la temperatura del fluido es igual a la del sólido.

El coeficiente de transferencia de calor por convección h no es una propiedad del fluido. Es un parámetro que se determina de forma experimental y cuyo valor depende de todas las variables que influyen sobre la convección, como la

configuración geométrica de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido, las propiedades de este y la velocidad masiva del mismo (2).

Tabla 1.5 Valores típicos del coeficiente de transferencia de calor por convección.

Tipo de convección	$[h, W/m^2 \cdot ^\circ C]$
Convección libre de gases	2 – 25
Convección libre de líquidos	10 – 1000
Convección forzada de gases	25 – 250
Convección forzada de líquidos	50 – 20000
Ebullición y condensación	2500 - 100000

Fuente: Tomado del libro Transferencia de Calor de Cengel Yunus (3)

1.3.1.4 RADIACIÓN

La radiación es la energía emitida por la materia en la forma de ondas electromagnéticas o fotones, como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. A diferencia de la conducción y la convección, la transferencia de energía por radiación no requiere la presencia de un medio interpuesto. La transferencia de energía por radiación es la más rápida, a la velocidad de la luz, y no sufre atenuación en el vacío. De esta manera llega a la Tierra la energía del Sol.

Para el presente caso es de interés la radiación térmica, que es la forma de radiación emitida por los cuerpos debido a su temperatura. Es diferente a las otras formas de radiación, como los rayos x, los rayos gama, las microondas, las ondas de radio y de televisión, que no están relacionadas con la temperatura. Todos los cuerpos a una temperatura arriba del cero absoluto emiten radiación térmica.

La radiación es un fenómeno volumétrico y todos los sólidos, líquidos y gases emiten, absorben o transmiten radiación en diversos grados. Sin embargo, la radiación suele considerarse como un fenómeno superficial para los sólidos que son opacos a la radiación térmica, como los metales, la madera, y las rocas, ya que las radiaciones emitidas por las regiones interiores de un material de ese tipo

nunca pueden llegar a la superficie, y la radiación incidente sobre esos cuerpos suele absorberse en unas cuantas micras hacia adentro de dichos sólidos (3).

La velocidad máxima de radiación que puede ser emitida desde una superficie a una temperatura T_S (en K) se expresa por la ley de Stefan-Boltzmann como:

$$\dot{Q}_{emitida,max} = \sigma A_S T_S^4 [W] \quad (1.9)$$

Donde $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2} \cdot K^4 \right]$, es la constante de Stefan-Boltzmann. La superficie idealizada que emite radiación a esta velocidad máxima se llama cuerpo negro y la radiación emitida por este es la radiación del cuerpo negro.

La radiación emitida por todas las superficies reales es menor que la emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura y se expresa como:

$$\dot{Q}_{emitida} = \varepsilon \sigma A_S T_S^4 [W] \quad (1.10)$$

En donde ε es la emisividad de la superficie. La emisividad cuyo valor está en el intervalo $0 \leq \varepsilon \leq 1$, es una medida de cuan próxima está una superficie de ser un cuerpo negro, para el cual $\varepsilon = 1$. En la **Tabla 1.6**, se dan las emisividades de algunas superficies.

Tabla 1.6 Emisividad de algunos materiales a 300 [K]

Material	Emisividad
Hoja de Aluminio	0,07
Cobre pulido	0,03
Oro pulido	0,03
Acero inoxidable pulido	0,17
Pintura negra	0,98
Pintura blanca	0,90
Suelo	0,93 – 0,96
Agua	0,96

Fuente: Tomado del libro *Transferencia de Calor* de Cengel Yunus (3)

Otra propiedad relativa a la radiación de una superficie es su absorptividad α , la cual es la fracción de energía de radiación incidente sobre una superficie que es absorbida por esta. Como la emisividad, su valor está en el intervalo $0 \leq \alpha \leq 1$ (2).

Un cuerpo negro absorbe toda la radiación incidente sobre él, es decir, un cuerpo negro es un absorbente perfecto, del mismo modo que es un emisor perfecto.

Tanto ϵ como α de una superficie dependen de la temperatura y de la longitud de onda de la radiación. La ley de Kirchhoff de la radiación afirma que la emisividad y la absorptividad de una superficie a una temperatura y longitud de onda dadas son iguales. La velocidad a la cual una superficie absorbe la radiación se determina a partir de la **Figura 1.5**.

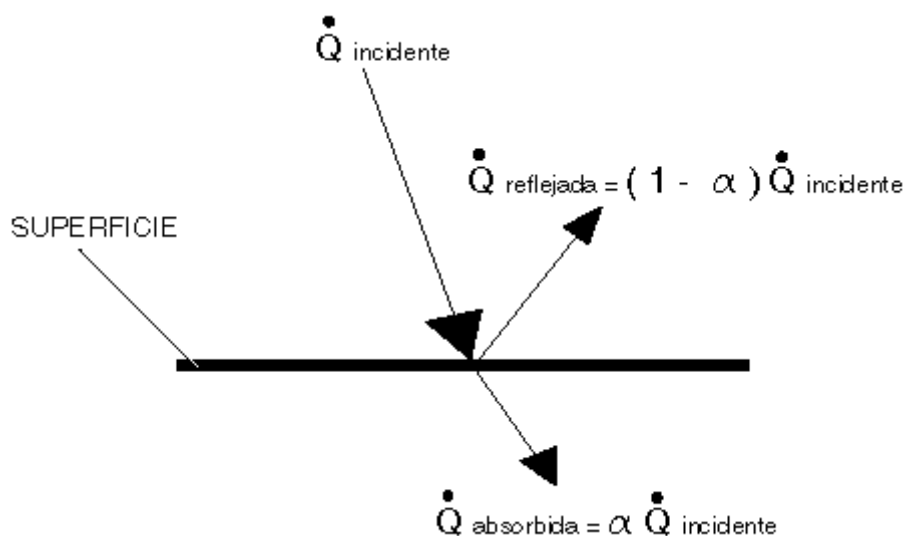


Figura 1.5 Absorción de la radiación incidente sobre una superficie opaca de absorptividad α (3)

$$\dot{Q}_{\text{absorbida}} = \alpha \dot{Q}_{\text{incidente}} \quad (1.11)$$

Donde $\dot{Q}_{\text{incidente}}$ es la velocidad a la cual la radiación incide sobre la superficie y α es la absorptividad de la superficie. Para las superficies opacas (no transparentes), la parte de la radiación incidente no absorbida por la superficie se refleja.

La diferencia entre las velocidades de la radiación emitida por la superficie y la radiación absorbida es la transferencia neta de calor por radiación. Si la velocidad de absorción de la radiación es mayor que la de emisión, se dice que la superficie está ganando energía por radiación. De lo contrario, se dice que la superficie está perdiendo energía por radiación (3).

En general, la determinación de la velocidad neta de la transferencia de calor por radiación entre dos superficies depende de las propiedades de las superficies, de la orientación de una con respecto a la otra y de la interacción del medio que existe entre ellas con la radiación.

Cuando una superficie de Emisividad ϵ y área superficial A_s que se encuentran a una temperatura absoluta T_s está completamente encerrada por una superficie mucho mayor, o negra, que se encuentra a la temperatura absoluta (T_{alred}) y separada por un gas (como el aire) que no interviene con la radiación, la rapidez neta de transferencia de calor por radiación entre estas dos superficies se expresa por (Figura 1.6).

$$\dot{Q}_{rad} = \epsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{alred}^4) [W] \quad (1.12)$$

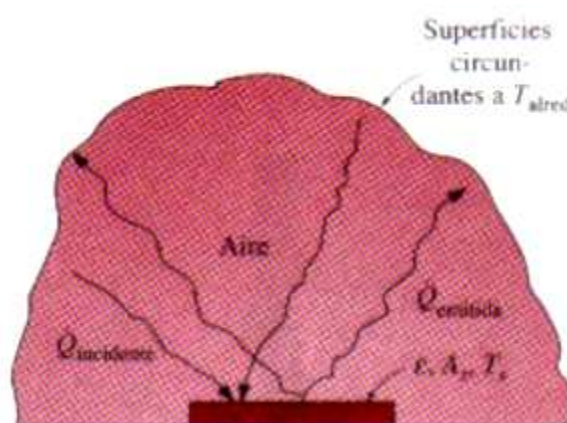


Figura 1.6 Transferencia de calor por radiación entre una superficie y las superficies que la circundan (3)

En este caso especial la emisividad y el área superficial de la superficie circundante no tienen efecto sobre la transferencia neta de calor por radiación.

La transferencia de calor por radiación hacia una superficie, o desde esta, rodeada por un gas como el aire, ocurre paralela a la conducción (o convección, si se tiene un movimiento masivo del gas) entre esa superficie y el gas. Por tanto, la transferencia total de calor se determina al sumar las contribuciones de los dos mecanismos de transferencia (3).

Por sencillez y conveniencia esto se lleva a cabo con frecuencia media la definición de un coeficiente combinado de transferencia de calor, $h_{\text{combinado}}$, que incluye los efectos tanto de la convección como de la radiación. Entonces, la velocidad total de transferencia de calor hacia una superficie, o desde esta, por convección y radiación se expresa como:

$$\dot{Q}_{\text{total}} = h_{\text{combinado}} A_S (T_S - T_{\infty}) \quad (1.13)$$

El coeficiente combinado de transferencia de calor es un coeficiente de transferencia de calor por convección modificado para incluir los efectos de la radiación.

La radiación suele ser significativa con relación a la conducción o a la convección natural, pero despreciable con respecto a la convección forzada. En las aplicaciones de convección forzada se suele descartar la radiación, en especial cuando las superficies que intervienen tienen emisividades bajas y temperaturas de bajas a moderadas (3).

1.4 COLECTOR SOLAR TÉRMICO TERMOSIFÓN

1.4.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

En la **Figura 1.7** se representa esquemáticamente el sistema de calentamiento de agua por termosifón solar.

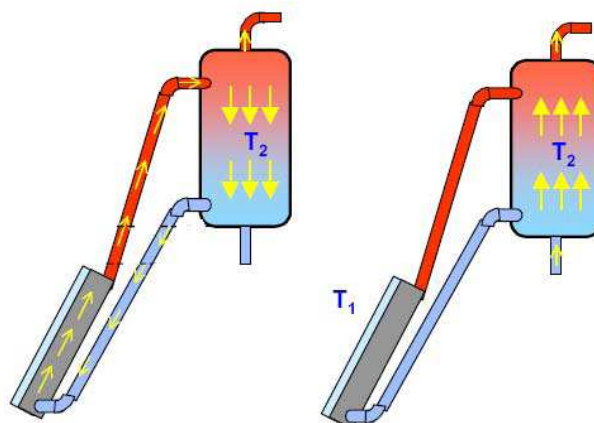


Figura 1.7 Representación de un sistema de calentamiento por termosifón solar (6)

Este sistema se caracteriza por que la circulación de agua se da por medios naturales, esto es el fluido al pasar por el colector gana energía, la que se traduce en un incremento de temperatura, la que causa una diferencia de densidades dentro del sistema que es en definitiva la que causa la circulación. El proceso de calentamiento del agua se da por un fenómeno de convección natural. El fluido circula del colector a la parte superior del tanque y de este al colector por la parte inferior (6). El componente principal del equipo es el colector, el cual se muestra esquemáticamente en la **Figura 1.8**.

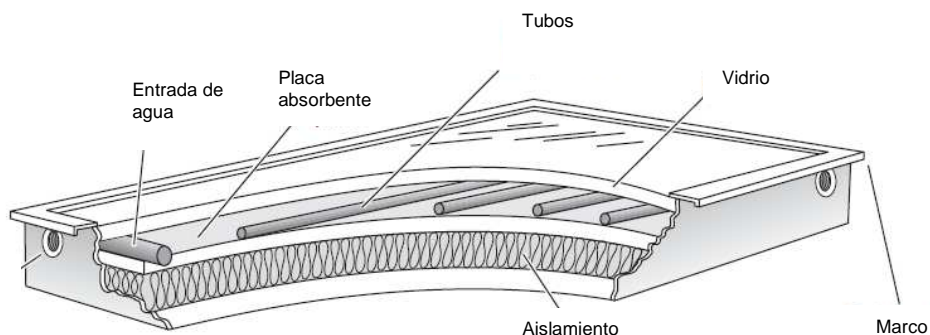


Figura 1.8 Representación de un colector solar de placa plana (6)

Como se denota en la figura este consta de una caja metálica cubierta de vidrio, siendo aislado por los lados y la base. Sobre la base está el aislante que la recubre, sobre el aislante se encuentra la placa absorbidora de los rayos solares a la que va soldado el banco de tubo por el que circula el fluido de trabajo. El colector generalmente se dispone con una inclinación respecto a la horizontal.

El banco de tubos se conecta por su parte superior al tanque mediante tubería que debe ser bien aislada al igual que la de retorno del colector que comunica la parte inferior del tanque con la inferior del colector.

El otro elemento constitutivo del sistema es el tanque de almacenamiento cuyo objetivo es guardar no solo el fluido, sino también almacenar su energía. Este debe tener dimensiones acordes con las del colector usado de manera que se pueda disponer de la cantidad apropiada de agua. El tanque debe ser perfectamente aislado para disminuir al máximo las pérdidas de calor (6).

1.4.2 PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO

Los rayos solares inciden sobre el vidrio del colector es cual es altamente transparente a esta radiación (90 a 98%), dicha radiación es absorbida por la placa, la cual actúa como una aleta pegada a cada uno de los tubos del colector promoviendo de esta manera la transferencia de calor a los tubos por un proceso de conducción. Los tubos se calientan por este medio directamente por la acción solar que incide sobre la parte expuesta de ellos y este calor es transferido al fluido, inicialmente en reposo, por un proceso de convección natural. La placa no absorbe toda la radiación incidente ya que parte de esta energía es emitida como radiación en el rango de infrarrojo, al cual el vidrio es opaco, siendo las pérdidas principalmente por un proceso de convección libre entre la placa y el vidrio (6).

1.4.2.1 Ventajas del sistema (6)

Entre las principales ventajas y beneficios que representa el uso de termosifones solares, se puede detallar los siguientes:

- Este sistema no requiere para su operación del uso de ningún otro tipo de energía que no sea la solar. Esto representa un claro beneficio en cuanto a un ahorro de energía de fuentes no renovables con el consiguiente ahorro de dinero para el usuario de recursos para el país.
- El costo inicial es más bajo respecto a otros sistemas de aprovechamiento de energía solar.

1.4.2.2 Desventajas del sistema (6)

Entre las principales desventajas que representa el uso del termosifón solar, podemos detallar los siguientes:

- El termosifón solar es un sistema de baja eficiencia o bajo rendimiento; es decir, la razón de energía transferida al agua versus la energía entregada al mismo, es bastante baja, habiendo sistemas de utilización del recurso solar que tienen un mejor rendimiento.
- Otra de las desventajas es la estética, ya que el tanque debe estar elevado por encima del colector el cual a su vez debe estar expuesto totalmente a los rayos solares.

1.5 EFICIENCIA DE UN COLECTOR SOLAR TÉRMICO PLANO

1.5.1 DESCRIPCIÓN DEL CIRCUITO TÉRMICO

En la **Figura 1.9** se esquematiza el circuito térmico equivalente en el cual se representan los distintos procesos de transferencia de calor que se dan en el colector solar.

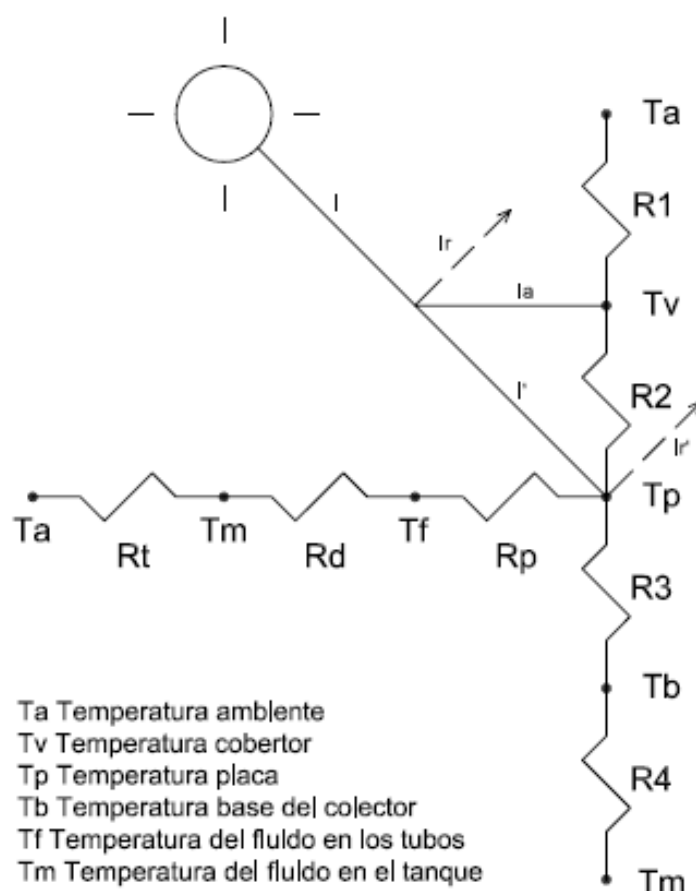


Figura 1.9 Circuito térmico del sistema. (6)

1.5.1.1 Pérdidas de calor hacia arriba en el colector (6)

El análisis de la **Figura 1.9**, que muestra el circuito térmico del sistema, permite identificar los distintos procesos de transferencia de calor desde la placa hacia arriba. La resistencia térmica R_2 corresponde al proceso combinado de radiación entre la placa y el vidrio y de convección libre en el espacio encerrado por ellas.

La resistencia térmica R_1 , representa así mismo el proceso combinado de radiación y convección entre el vidrio y el aire ambiental.

1.5.1.2 Pérdidas de calor hacia abajo en el colector

Nuevamente el análisis del circuito térmico de la **Figura 1.9** permite identificar los procesos de transferencia de calor hacia abajo del colector.

Estos procesos son el de conducción a través del aislante representado por la resistencia térmica R_3 y la resistencia térmica R_4 representa el proceso de convección desde la base de la caja del colector al aire exterior. En un colector bien aislado como lo son la mayoría de ellos, el proceso conectivo base-aire ambiental es insignificante, por lo que su valor es aproximadamente cero.

La resistencia R_3 corresponde al proceso de conducción a través del aislante. La determinación de este proceso es bastante compleja, sin embargo en un colector bien diseñado estas pérdidas son mínimas, y no es necesario determinarlas con exactitud (6).

1.5.2 ANÁLISIS DE LAS PÉRDIDAS EN EL TANQUE Y EN LA TUBERIAS CONECTORAS

El tanque reservorio y las tuberías conectoras en un sistema de termosifón solar generalmente están muy bien aisladas, por lo que las pérdidas de calor tienen lugar principalmente por conducción a través de las paredes y el aislante (6).

1.5.2.1 ANÁLISIS DE LA ENERGÍA SOLAR INCIDENTE

Los colectores de sistema de termosifón solar por regla general se encuentran inclinados respecto a la horizontal en un ángulo que fluctúa entre 10° y 45° con la finalidad de mejorar la recepción de rayos solares.

En lo que respecta al fenómeno de radiación solar a través del vidrio, este en general posee tres características bien definidas y que dependen del tipo de vidrio y su espesor y son:

- **Absorbencia** α_v : Es la fracción de energía absorbida.
- **Transmisividad** τ_v : Es la fracción de energía transmitida.
- **Reflexibilidad** ρ_v : Es la fracción de energía reflejada.

Es decir, la energía radiante que llega al vidrio puede ser absorbida, reflejada y transmitida. Por la primera ley de la termodinámica se tiene:

$$\alpha + \tau + \rho = 1 \quad (1.14)$$

Para el vidrio el valor de τ es bastante mayor al de α y ρ , en general su comportamiento es como se muestra en la **Figura 1.10**.

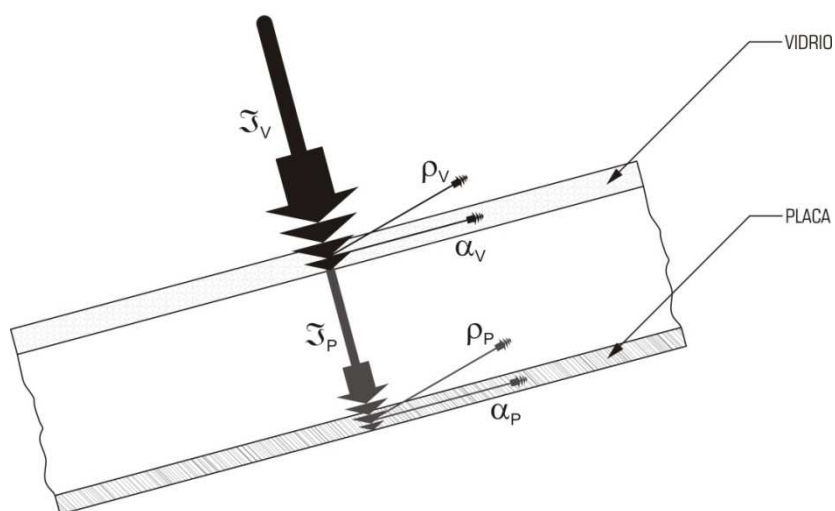


Figura 1.10 Representación esquemática de las características de transmisividad, absorptividad y reflectividad del vidrio cobertor y placa absorbidora de un colector solar (6)

Por lo tanto, la fracción de energía solar transmitida por el vidrio será:

$$I_v = \tau_v \quad (1.15)$$

De igual manera, como se aprecia en la **Figura 1.10**, la placa posee las mismas características, diferenciándose de estas en sus magnitudes, ya que mientras en el vidrio la transmisividad τ se aproxima a la unidad, en la placa metálica el valor

de la absorptibilidad es el predominante. Estas características son las que hacen que estos materiales sean los apropiados para la construcción de colectores solares. En consecuencia la fracción de energía solar absorbida por la placa es:

$$I = \alpha_p \tau_v I_o \quad (1.16)$$

En la **Figura 1.11** se observa un resumen de las pérdidas de energía del sistema termosifón solar.

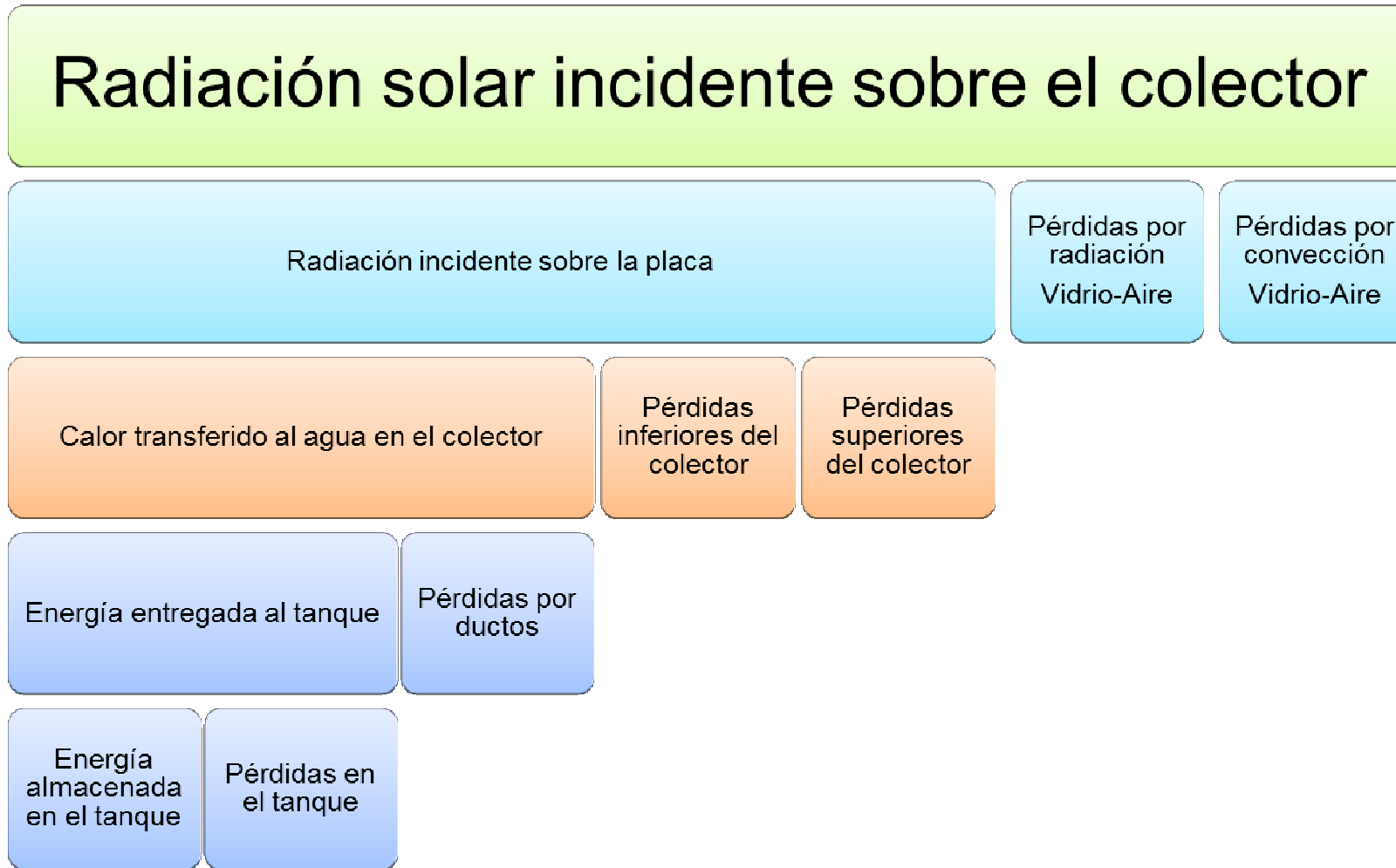


Figura 1.11 Pérdidas de energía del sistema termosifón solar (6)

1.5.3 EFICIENCIA DEL SISTEMA

1.5.3.1 Balance de energía del sistema

En la **Figura 1.12** se muestra el esquema del sistema de termosifón solar y se delimita el volumen de control que encierra al mismo (6).

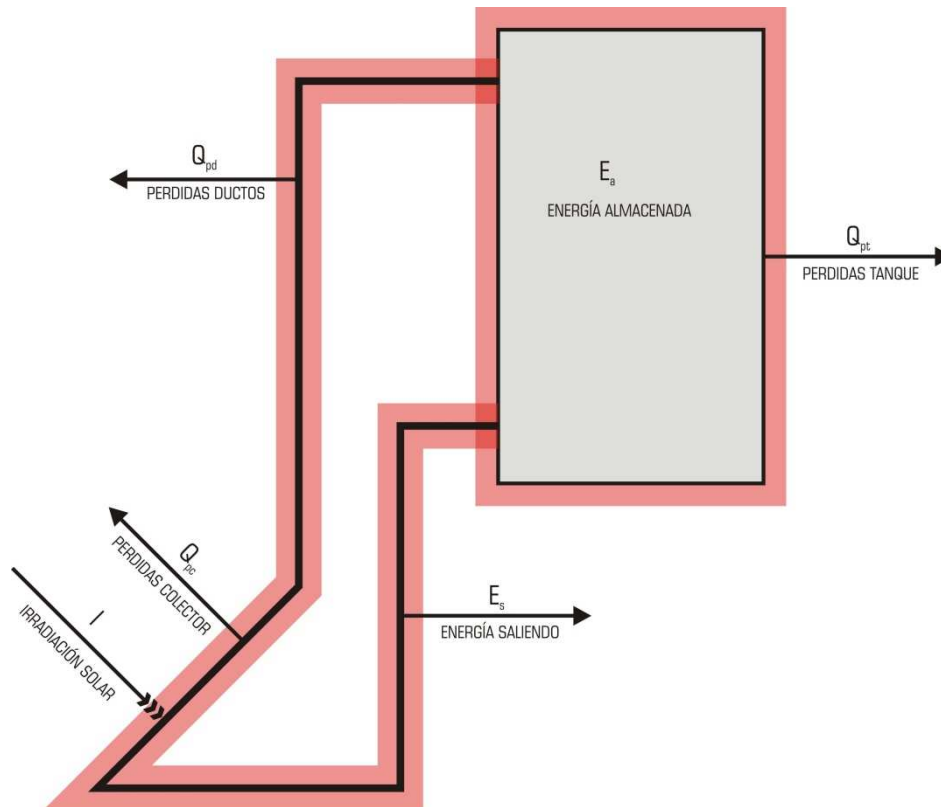


Figura 1.12 Volumen de control del sistema (6)

Para plantear el respectivo balance de energía dentro de tal volumen de control se realiza las siguientes asunciones:

- Las temperaturas medias de la placa colectora, los tubos de circulación y del tanque de almacenamiento son iguales a la respectiva temperatura media del agua dentro de ellos.
- Las temperaturas medias del agua en el colector, el tanque y las tuberías conectoras son iguales y se denotan por una temperatura media del sistema T_m .

En base a ello se tiene que:

energía solar efectiva

= energía almacenada por el sistema + pérdidas al ambiente

$$\tau\alpha F_c A_c I = \sum C_T \left(\frac{dT_m}{d\theta} \right) + \sum U_S (T_m - T_a) \quad (1.17)$$

Dónde:

τ = Transmisividad del vidrio.

α = Absortividad de la placa.

F_c = Eficiencia del colector.

A_c = Área del colector [m^2]

I = Radiación incidente [$\frac{W}{m^2}$].

$\sum C_T$ = Sumatorio de las capacidades térmicas de la placa y sus tubos, tuberías conectoras, tanque y la capacidad térmica del agua almacenada en ellos [$\frac{J}{^\circ K}$].

$\frac{dT_m}{d\theta}$ = Variación de la temperatura respecto al tiempo.

$\sum U_S$ = Sumatorio de los coeficientes de pérdidas del calor del sistema, es decir, hacia arriba y abajo del colector, por los tubos conectores y por el tanque [$\frac{W}{^\circ K}$].

T_m = Temperatura media del sistema [$^\circ K$].

T_a = Temperatura ambiental [$^\circ K$].

1.5.3.2 Balance de energía del tanque

En la **Figura 1.13** se muestra el esquema del sistema de termosifón solar, y se delimita el volumen de control que encierra al tanque de almacenamiento.

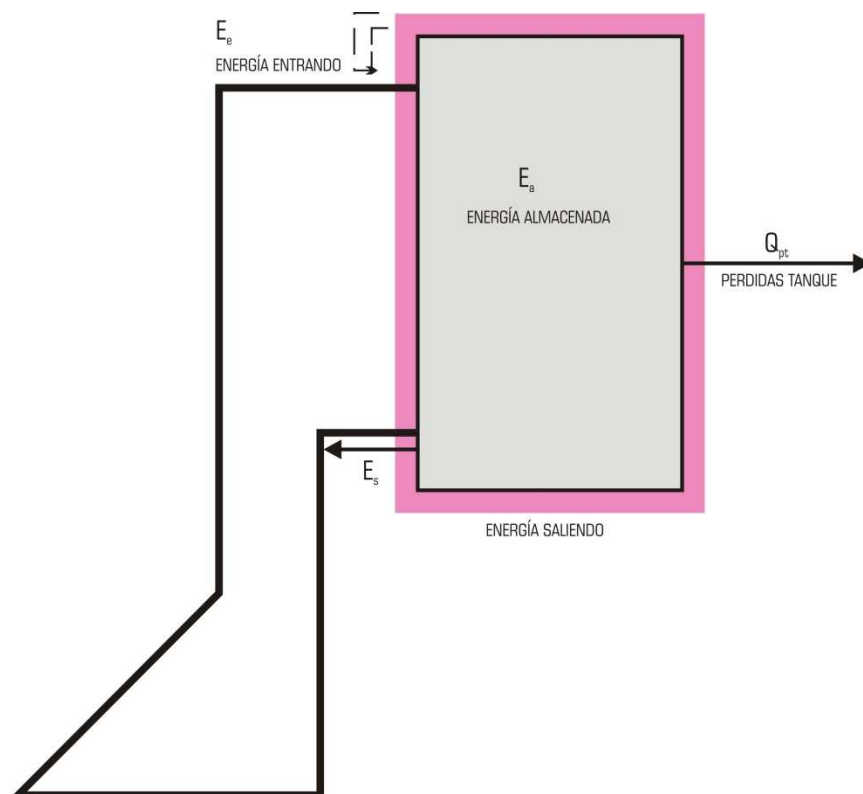


Figura 1.13 Volumen de control de un tanque (6)

Para plantear la ecuación del balance de energía del tanque se realizan en las mismas asunciones del apartado anterior y se tiene entonces:

energía que entra – energía que sale = energía almacenada + pérdidas al ambiente

$$mC_{pa}(T_{in} - T_{out}) = CT_{Tan} \left(\frac{dT_m}{d\theta} \right) + U_p(T_m - T_a) \quad (1.18)$$

Dónde:

C_{pa} = Calor específico del agua $\left[\frac{J}{kg} \cdot ^\circ K\right]$.

m = Flujo másico por termosifón $\left[\frac{kg}{s}\right]$.

T_{in} = Temperatura del agua a la entrada del tanque $[^\circ K]$.

T_{out} = Temperatura del agua a la salida del tanque $[^\circ K]$.

CT_{Tan} = Capacidad térmica del tanque $\left[\frac{J}{^\circ K}\right]$.

1.5.3.2.1 Determinación teórica de la temperatura media y la eficiencia del sistema

Los principales parámetros de funcionamiento del sistema de termosifón solar, son la temperatura media del agua y su razón de flujo másico, por lo que se utiliza las dos ecuaciones de balance de energía antes mencionadas (1.17) y (1.18) para predecir teóricamente tales valores.

La **Ecuación (1.17)** aplicada al sistema se puede reordenar de la siguiente forma:

$$\frac{dT_m}{d\theta} + \frac{\sum U_S}{\sum C_T} T_m - \frac{\sum U_S T_a + \tau \alpha F_C A_C I}{\sum C_T} = 0 \quad (1.19)$$

La resolución de esta ecuación permite obtener la temperatura media instantánea del sistema T_m y adicionalmente la respectiva razón de variación de ella respecto al tiempo $\frac{dT_m}{d\theta}$.

Con los valores obtenidos, se puede determinar la eficiencia instantánea del sistema definida por:

$$i = \frac{m C_{pa} (T_{out} - T_{in})}{I A_C} \quad (1.20)$$

Es una medida de la capacidad de colección de calor del colector e indica la razón a la cual la energía radiante incidente es convertida en energía térmica útil. (6)

CAPÍTULO 2

DISEÑO DEL PROTOTIPO DEL SISTEMA ADQUISICIÓN DE DATOS PARA UN COLECTOR TÉRMICO SOLAR

2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN

El prototipo general está compuesto de varios subsistemas, los cuales se encargan de funciones propias, las mismas que se interrelacionan entre sí para cumplir con el fin específico de adquirir variables físicas de un sistema solar termosifón para calentamiento de agua y transmitirlos inalámbricamente.

Los subsistemas que posee el prototipo a breves rasgos son:

- El subsistema de alimentación está constituido básicamente de una fuente de alimentación ATX y de una regleta con dos tomacorrientes dobles. Ambas partes tienen como suministro de energía la red general eléctrica. La fuente de alimentación provee de voltajes continuos que son: + 5 [V_{DC}], - 5 [V_{DC}], + 3.3 [V_{DC}], +12 [V_{DC}] y -12 [V_{DC}], y la regleta con los tomacorrientes provee voltajes alternos de 120 [V_{AC}]. Los voltajes antes mencionados sirven para la alimentación de los diferentes circuitos impresos que contienen los subsistemas.
- En los subsistemas de acondicionamiento, las señales de los sensores de temperatura, humedad, radiación, conductividad y flujo que se encuentran ubicados en diferentes posiciones del colector térmico solar o sistema solar termosifón son previamente acondicionadas mediante algunos circuitos electrónicos los mismos que permiten su posterior lectura al subsistema central de adquisición.
- El sistema posee un subsistema central de adquisición que es manejado por un microcontrolador el cual permite el control y la recolección ordenada de las diferentes variables físicas requeridas además de enviarlas al subsistema de transmisión y al subsistema de visualización.

- El subsistema de transmisión es el encargado del envío inalámbrico de los datos tratados por el microcontrolador del subsistema central de adquisición hacia un computador distante del sistema implementado. Adicionalmente permite la comunicación de comandos específicos del computador al subsistema central de adquisición.
- Otra de las partes constitutivas del prototipo es el subsistema de visualización, el cual muestra las variables físicas adquiridas localmente, esto es donde se encuentra ubicado todo el sistema de adquisición para el colector térmico solar. Además cumple con el almacenamiento de respaldo de los datos adquiridos en una tarjeta de memoria extraíble SD. Este subsistema es también manejado por un microcontrolador.
- Los datos que son a su vez las variables físicas recopiladas son enviados por el sistema de adquisición a un computador donde los mismos son manejados a través de una interfaz hombre-máquina (HMI) y también son almacenados en un archivo para su posterior tratamiento.
- El sistema consta de una estructura metálica para mantener fijos los diferentes circuitos electrónicos impresos a una distancia adecuada y conservar las interconexiones con cables entre los mismos seguras. El sistema también posee la adaptación de algunos dispositivos de tubería y plomería tanto para el montaje fácil y cómodo de los sensores como también la conexión adecuada a cualquier colector térmico solar.

La caja metálica se caracteriza por ser un gabinete pesado de metal, compuesto de tol negro con pintura electrostática al horno. Cumple también con la norma IP-66. Adicionalmente, en su puerta frontal, posee un vidrio transparente que permite la visualización hacia el interior de la misma. Constan también las diferentes canaletas para cables, la barra equipotencial para tierra, dos tomas corrientes dobles para alimentación y una riel DIN para la colocación de borneras para la conexión de los cables de los diferentes sensores hacia los respectivos circuitos electrónicos impresos.

Adicionalmente el gabinete posee una serie de 10 conectores prensa estopa que sirven para la sujeción del cable de cada sensor

A continuación se puede apreciar en la **Figura 2.2** el gabinete metálico construido.



Figura 2.2 Gabinete metálico. Fotografía en el LEAEE¹ de la FIM (10-01-2011)²

¹ LEAEE (Laboratorio de Energías Alternativas y Eficiencia Energética)

2.2.2 DISPOSITIVOS DE TUBERÍA Y GRIFERÍA PARA MONTAJE DE SENSORES

Estos dispositivos se encuentran diseñados y manufacturados bajo las especificaciones y recomendaciones de los fabricantes, ya que los mismos delimitan una distancia entre el sensor y las conexiones de codos o tes de las tuberías para un correcto funcionamiento de los mismos. Los dispositivos dispuestos en el colector térmico solar se detallan en los siguientes numerales.

2.2.2.1 Dispositivo para montaje de sensor de Flujo FP7001A

Este dispositivo de montaje de tubería y grifería para el sensor de Flujo FP7001A está hecho de PVC de 1 ¼ [pulg] para agua potable. Posee algunas válvulas dispuestas de diferente forma para cumplir con una adecuada calibración. Adicionalmente los espacios que se encuentran entre el sensor y los dispositivos como codos o válvulas como se denotan en la **Tabla 2.1** que son las distancias recomendada por el fabricante del sensor para su correcto funcionamiento.

Tabla 2.1 Distancias para montaje del sensor de Flujo FP7001A

<i>Obstrucción Aguas Arriba</i>	Distancia Requerida al sensor
Reductor Concéntrico	15 veces diámetro de tubería
Codo	20 veces diámetro de tubería
2 Codos en el mismo plano	25 veces diámetro de tubería
2 codos en dos planos o expansión	40 veces diámetro de tubería
Válvulas, bombas en el mismo plano	Al menos 50 veces diámetro de tubería

Fuente: Distancias propuestas por el fabricante del sensor FP7001A (21)

En la **Figura 2.3** se tiene la vista del dispositivo para el montaje del sensor. Cabe mencionar que este sensor se encuentra a la entrada de suministro de agua por lo que el dispositivo después del sensor posee una válvula check para el no retorno del agua del colector térmico solar.

² FIM (Facultad de Ingeniería Mecánica)



Figura 2.3 Vista del dispositivo para montaje del sensor de Flujo FP7001A. Fotografía tomada en la terraza de la FIM (28-04-2011)

2.2.2.2 Dispositivo para montaje de sensor de Flujo FP5600

El dispositivo para el montaje del sensor de Flujo FP5600 está constituido por tubería y grifería de cobre de 1 [pulg] debido a las conexiones de cobre que posee tanto el tanque y la placa colectora del colector térmico solar. Como el dispositivo anterior posee válvulas dispuestas de diferente forma para cumplir con la respectiva calibración. Adicionalmente los espacios con que se construyó el dispositivo son los recomendados por el fabricante donde la nomenclatura I.D. designa el diámetro interno de la tubería. Las distancias se encuentran en la **Figura 2.4** (21).

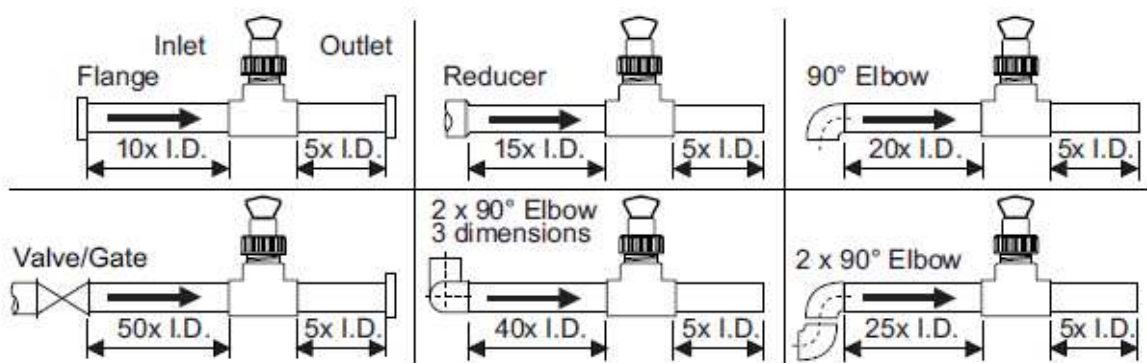


Figura 2.4 Distancias para montaje del sensor de Flujo FP5600 (21)

En la **Figura 2.5** se muestra la vista dispositivo de montaje realizado. Cabe mencionar que este sensor se encuentra a la entrada superior del tanque de agua

y a la salida de la placa colectora por lo que posee en su grifería una vaina para el montaje de una termocupla para la medición de temperatura en ese punto.



Figura 2.5 Vistas del dispositivo para montaje del sensor de Flujo FP5600. Fotografía tomada en el LEAEE de la FIM (28-04-2011)

2.2.2.3 Dispositivo para montaje de Sensor de Conductividad SC4A

El montaje para el sensor de conductividad SC4A está dispuesto para la calibración y fácil instalación del mismo. El material constitutivo del dispositivo tanto en su tubería y grifería es de cobre de $\frac{1}{2}$ [pulg] debido a las conexiones con el colector térmico solar. Conserva válvulas para la opción de paso o no por el sensor. En la **Figura 2.6** se muestra la vista del dispositivo y de manera similar el dispositivo del numeral anterior mantiene en la grifería una vaina para el montaje de una termocuplas.



Figura 2.6 Vistas del dispositivo para montaje del sensor de Conductividad SC4A. Fotografía tomada en el LEAEE de la FIM (28-04-2011)

2.3 SUBSISTEMA DE ALIMENTACIÓN

El subsistema de alimentación está formado por dos componentes que son la fuente de alimentación ATX de voltajes continuos y la regleta de tomacorrientes dobles que abastece voltajes alternos. Cada componente cumple con administrar un voltaje o varios voltajes según los requerimientos de los circuitos impresos de los diferentes subsistemas.

La fuente de alimentación para el sistema de adquisición para algunos de los circuitos electrónicos impresos es una fuente switching de computadora, la misma que es alimentada por la red eléctrica normal, que a su vez va conectada a la regleta de tomacorrientes dobles. Esta fuente entrega varios voltajes: +5 [V_{DC}], -5 [V_{DC}], +3.3 [V_{DC}], +12 [V_{DC}], -12 [V_{DC}].

2.3.1 FUENTE DE ALIMENTACIÓN ATX12V

Esta fuente de alimentación cumple con las especificaciones ATX para su montaje en las placas madres y chasis de computadoras. Se caracteriza por un incremento en la capacidad de voltajes de 12 [V_{DC}] por lo que su conector también cambia. Soporta la fuente una conversión DC/DC de +12 [V_{DC}], +5 [V_{DC}] y +3.3 [V_{DC}]. Mantiene una corriente de 2 a 2.5 [A] aun Voltaje Stand By (VSB) de +5 [V_{DC}] (29).

2.3.1.1 Características Eléctricas

Para mantener una operación óptima de la fuente la entrada de corriente alterna se limita a las características dadas en la **Tabla 2.2**.

Tabla 2.2 Requerimientos de alimentación AC de entrada

Parámetro	Mínimo	Nominal	Máximo	Unidad
Voltaje de entrada a 115 [V _{AC}]	90	115	135	[V _{ACrms}]
Voltaje de entrada a 230 [V _{AC}]	180	230	265	[V _{ACrms}]
Frecuencia de Entrada	47	-	63	[Hz]

Fuente: Tomado de la hoja técnica de la Fuente ATX12V (29)

Las protecciones de la entrada de la fuente ATX12V se colocan a continuación:

Protección de sobrecorriente de entrada: La fuente incorpora un fusible primario para resguardo de daños en la misma. Este fusible se caracteriza por ser de acción lenta.

Limitación de sobrepico de corriente: La máxima corriente pico a la entrada es limitada cuando se enciende la fuente en cualquier punto de la onda sinusoidal. Adicionalmente no se produce ningún daño cuando la fuente se enciende y apaga cíclicamente.

Protección de bajo voltaje: La fuente de alimentación contiene circuitos de protección para los voltajes de entrada por debajo del mínimo especificado en la **Tabla 2.2.**

Protección de falla fatal: En caso de producirse un fallo de un componente, la fuente de alimentación no presenta fuego, exceso de humo, circuitos impresos carbonizados, conductores fundidos del circuito impreso, ruido excesivo y emisión de material fundido (29).

2.3.1.2 Normativa

La fuente de alimentación está aprobada y cumple con la versión actual de los requisitos de las especificaciones reglamentarias y/o normas para seguridad de producto y compatibilidad electromagnética. Entre las normas que amparan a la fuente ATX12V en seguridad de producto se encuentran *UL* 60950, CAN/CSA-C22.2-60950-00, EN*60 950, IEC*60 950, EU* Low Voltage Directive (73/23/EEC), GB4943-90 CCIB* (China)* y para compatibilidad electromagnética esta *FCC*(Class B, Part 15), CISPR* 22 / EN55022, EN55024 (ITE Specific Immunity) EN 61000-4-2 (Electrostatic Discharge), EN 61000-4-3 (Radiated RFI Immunity), EN 61000-4-4 (Electrical Fast Transients), EN 61000-4-5 (Electrical Surge), EN 61000-4-6 (RF Conducted), EN 61000-4-8 (Power Frequency Magnetic Fields), EN 61000-4-11 (Voltage Dips, Short Interrupts and Fluctuations), EN61000-3-2 (Harmonics), EN61000-3-3 (Voltage Flicker), EU EMC Directive (8/9/336/EEC) (CE Compliance).*(29)

2.3.1.3 Salida de Corriente Directa (DC)

Los voltajes de salida DC se mantienen dentro de los rangos de regulación que se muestran en la **Tabla 2.3** cuando se mide al extremo de los conectores de salida en toda la línea, plena carga y las condiciones ambientales. Los límites de regulación de voltaje se mantendrán en funcionamiento continuo para cualquier temperatura de estado estable y condiciones de funcionamiento (29).

Tabla 2.3 Valores de voltaje DC de salida

Salida	Rango	Mínimo	Nominal	Máximo	Unidad
+12 [V _{DC}]	+/- 5%	+11.40	+12.00	+12.60	[V]
+ 5 [V _{DC}]	+/- 5%	+4.75	+5.00	+5.25	[V]
+3.3 [V _{DC}]	+/- 5%	+3.14	+3.3	+3.47	[V]
-5 [V _{DC}]	+/- 5%	+11.40	+12.00	+12.60	[V]
-12 [V _{DC}]	+/- 10%	-10.80	+12.00	+13.20	[V]
+ 5 [V _{SB}]	+/- 5%	+4.75	+5.00	+5.25	[V]

Fuente: Tomado de la hoja técnica de la Fuente ATX12V (29)

2.3.1.4 Salida de Rizado/Ruido

El rizado o el ruido a la salida figuran en la **Tabla 2.4** que se reúnen a lo largo de rangos de carga y en todas las condiciones de voltaje de entrada según el fabricante. El rizado y el ruido se definen como señales periódicas o señales al azar sobre una banda de frecuencia de 10 [Hz] a 20 [MHz].

Tabla 2.4 Valores de Rizado/Ruido del voltaje DC de salida

Salida	Rizado y Ruido Máximo (mVpp)	Unidad
+12 [V _{DC}]	120	[mV]
+ 5 [V _{DC}]	50	[mV]
+3.3 [V _{DC}]	50	[mV]
-5 [V _{DC}]	50	[mV]
-12 [V _{DC}]	120	[mV]
+ 5 [V _{SB}]	50	[mV]

Fuente: Tomado de la hoja técnica de la Fuente ATX12V (29)

2.3.1.5 Protecciones de salida

La fuente ATX12V posee varias protecciones a las salidas de sus diferentes voltajes detallándolas a continuación:

Protección de sobrevoltaje: El circuito de detección de exceso de voltaje y de referencia son independientes y distintos de los circuitos de control del regulador y de referencia. No solo un punto de falla es capaz de causar una condición sostenida de sobrevoltaje en cualquiera en todas las salidas. El suministro de cierre proporciona protección contra sobrevoltajes según la **Tabla 2.5**.

Tabla 2.5 Valores de sobrevoltajes de Voltaje de salida DC

Salida	Mínimo	Nominal	Máximo	Unidad
+12 [V _{DC}]	13.4	15.0	15.6	[V]
+ 5 [V _{DC}]	5.74	6.3	7.0	[V]
+3.3 [V _{DC}]	3.76	4.2	4.3	[V]

Fuente: Tomado de la hoja técnica de la Fuente ATX12V (29)

Protección de Corto circuito: Un cortocircuito en cualquier salida de voltaje se define como cualquier impedancia de salida de menos de 0,1 ohmios. La fuente de alimentación se apaga y cierra el circuito a las salidas de +3,3 [V_{DC}], +5 [V_{DC}], o +12 [V_{DC}]. Las salidas de +12 [V_{DC}] tienen distintos circuitos de corto circuito y protección de sobrecarga. Los cortos circuitos entre las señales de la salida principal y el voltaje +5 [V_{SB}] no causan ningún daño a la fuente de alimentación. La fuente se apaga y cierra apagando las salidas negativas. El voltaje +5 [V_{SB}] debe ser capaz de estar en corto circuito por tiempo indefinido, pero cuando se quita el corto circuito, la fuente de alimentación se recupera de forma automática. La potencia máxima de cortocircuito en cualquier salida no excede de 240 [VA], por los requisitos de la norma IEC 60950.

Operación sin carga: No hay daños o situaciones de peligro cuando todos los conectores de salida de voltaje DC estén desconectados de alguna carga. La fuente de alimentación puede permanecer en el estado de cierre (29).

Protección de sobrecorriente: Si existen corrientes de sobrecarga a cada salida se apaga la fuente antes de que la potencia equivalente o superior sea de 240 [VA].

Protección de sobrettemperatura: La fuente de alimentación incluye un sensor de protección de sobrecalentamiento para suministrar energía a la temperatura preestablecida. Si se sobre calienta la fuente sobre lo normal por el resultado de la sobrecarga de corriente interna o falla del ventilador de enfriamiento, la fuente se apaga automáticamente (29).

2.3.2 ALIMENTACIÓN PARA CIRCUITO IMPRESOS

Las alimentaciones para los diferentes circuitos electrónicos disponen de los conectores de entrada pero adicionalmente se colocan filtros pi. Este filtro añade un capacitor, una bobina de choque y otro capacitor a la entrada de la alimentación. El efecto de los capacitores y de la bobina es mejorar la acción de filtraje aumentando la carga almacenada en estos componentes reactivos. Una corriente de carga derivada de estos suministros tendrá menos ondulación en la salida.

Los valores de voltaje para los diferentes circuitos impresos se disponen en la **Tabla 2.6**.

Tabla 2.6 Voltajes de las placas de circuitos electrónicos impresos

Circuito Impreso	Voltajes
<i>Adquisición (Principal)</i>	+5 [V _{DC}]
<i>Visualización</i>	+5 [V _{DC}]
<i>Transmisión</i>	120 [V _{AC}]
<i>Termocuplas</i>	+12 [V _{DC}], -12 [V _{DC}]
<i>Frecuencia y Varios ADCS</i>	+5 [V _{DC}], +3.3 [V _{DC}], +12 [V _{DC}], -12 [V _{DC}]
<i>Conductividad</i>	+12 [V _{DC}], -12 [V _{DC}]

Los diagramas circuitales para cada alimentación en los diferentes circuitos impresos se colocan en la **Figura 2.7**. En los diferentes diagramas se coloca un led indicativo para verificación de alimentación.

Para el circuito electrónico de la transmisión se coloca 120 [V_{AC}], es por motivos de que el mismo posee un adaptador de corriente alterna a corriente continua, siendo esta la característica del módulo de transmisión Xbee.

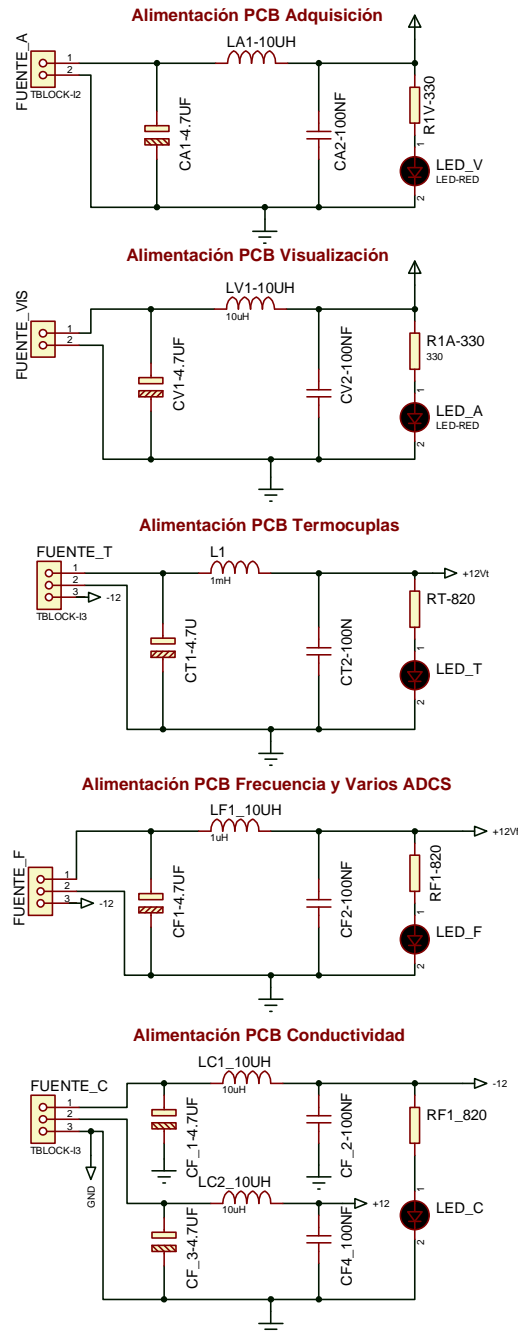


Figura 2.7 Diagramas circuitales de alimentación de las placas de circuitos electrónicos impresos

Los diagramas circuitales fueron realizados en el paquete Proteus ISIS V 7.7.

2.4 ACONDICIONAMIENTO DE SENSORES

El sistema de adquisición de datos para el colector térmico solar posee varios subsistemas de acondicionamiento para los transductores de las variables de temperatura, humedad, radiación, conductividad y flujo. Por lo que en los numerales posteriores se explica los diferentes sensores utilizados y su respectivo acondicionamiento.

2.4.1 SENSORES DE TEMPERATURA

Por requerimiento en el tratamiento posterior de los datos se necesita verificar la temperatura en varios puntos del colector térmico solar o colector termosifón siendo la nomenclatura para las temperaturas escritas en la **Tabla 2.7** de la siguiente forma:

Tabla 2.7 Nomenclatura de temperaturas

Temperatura	Nomenclatura
<i>Entrada de suministro de agua fría</i>	T_1
<i>Salida de suministro de agua caliente</i>	T_2
<i>Entrada de agua al colector</i>	T_3
<i>Salida de agua del colector</i>	T_4
<i>Superficie superior del acumulador</i>	T_5
<i>Superficie inferior del acumulador</i>	T_6
<i>Ambiente</i>	T_A
<i>Extras</i>	T_7, T_8, T_9

En la eficiencia general del sistema se parte de una temperatura de entrada y una de salida siendo estas temperaturas T_1 y T_2 , las temperaturas del agua de suministro tanto de agua fría como de agua caliente.

En el análisis de las temperaturas en la eficiencia para un colector termosifón se tiene que la temperatura del agua del colector, tanque y tuberías debe ser igual.

Cabe destacar que cuando existe una diferencia de temperatura entre T_3 y T_4 con la adecuada radiación solar el efecto termosifón del colector comienza su operación hasta que se equiparen dichas temperaturas.

La temperatura superficial T_5 sirve para identificar a que temperatura sube la placa del acumulador, siendo base para un análisis posterior de la temperatura incidente vs rendimiento o radicación. Mientras que la temperatura T_6 es dispuesta para verificar si hay un aumento de temperatura teniendo una repercusión en las pérdidas bajo el colector contrastándose con la temperatura ambiente T_A .

Las tres temperaturas extras restantes sirven para la ampliación en las lecturas para termocuplas tipo J.

Los principios de acondicionamiento para los sensores que miden las distintas temperaturas vienen dadas según tipo del sensor, montaje y salida dados en la **Tabla 2.8**.

Tabla 2.8 Sensores de temperatura

Temperatura	Tipo	Salida	Rango de Operación
T_1	Sensor de circuito integrado	10 [mV/°C]	2 a 150 [°C]
T_2	Termocupla tipo J	51.7 [μ V/°C]	-200 a 1200[°C]
T_3			
T_4			
T_5			
T_6			
T_7, T_8, T_9			
T_A	Sensor SHT15	Digital	-40 a 123.8 [°C]

Fuente: Rangos de voltaje de las hojas técnicas de los sensores FP7001A, termocupla tipo J y SHT15 (14)(20)(22)

Los rangos de temperatura de los diferentes sensores y transductores son adecuados para el sistema de adquisición porque tanto la temperatura del agua no baja de los 0 [°C] ni supera los 92 [°C], adicionalmente la temperatura de la placa del colector no supera los 150 [°C] por las condiciones ambientales y condiciones del colector térmico solar. Como se describió las características de temperatura para el clima de Quito en la **Tabla 1.3** la temperatura mínima que llegó es de 6.9 [°C] y las máxima no superó los 25 [°C] siendo adecuado la utilización del sensor SHT15 bajo el rango de operación dado.

Realizando el diagrama de bloques general para la adquisición de temperatura se obtiene la **Figura 2.8** donde se muestra las partes del proceso de adquisición.

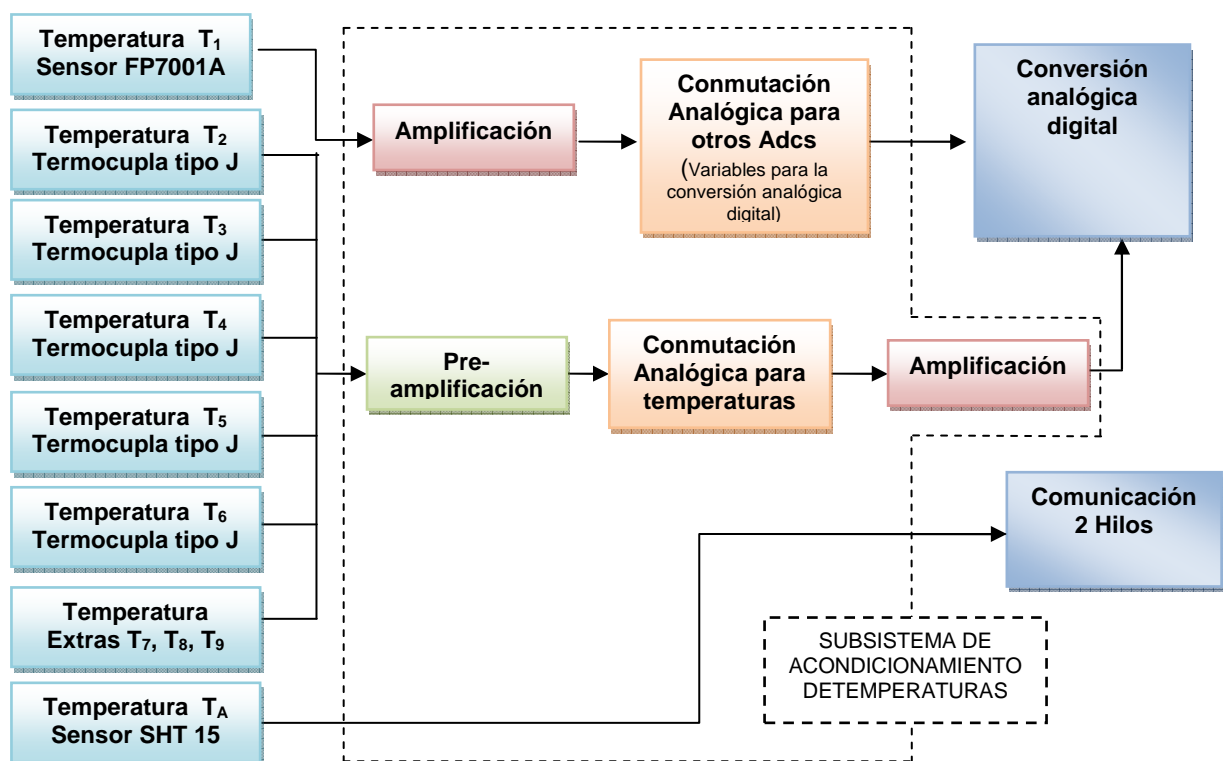


Figura 2.8 Diagrama de Bloques para adquisición de temperaturas

Para la conmutación analógica de las diferentes señales de los sensores se utilizan el circuito integrado 4052 y el circuito integrado ADG509A que son circuitos integrados multiplexores/demultiplexores análogos. Los multiplexores análogos se controlan digitalmente por tres entradas conectadas al microcontrolador del subsistema de adquisición. Cabe señalar que el acondicionamiento del sensor para la temperatura T₁ se encuentra en el circuito impreso de "Frecuencias y Varios ADCS" y el acondicionamiento de las

termocuplas para las temperaturas T_2 hasta la temperatura T_9 se halla en el circuito impreso de "Termocuplas".

Las características principales de los circuitos integrados antes mencionados se disponen en la **Tabla 2.9**.

Tabla 2.9 Características del circuito integrado 4052 y ADG509A

Integrado	Parámetro	Símbolo	Rango	Unidad
4052	<i>Voltaje de Alimentación DC</i>	V_{DD}	0.5 ~ +18.0	[V]
	<i>Voltaje de entrada o salida</i>	V_{in}, V_{out}	-0.5 ~ $V_{DD}+0.5$	[V]
ADG509A	<i>Voltaje de Alimentación DC</i>	V_{DD}	+10.8 ~ +16.5	[V]
	<i>Voltaje de entrada o salida</i>	V_{in}, V_{out}	0 ~ +16.5	[V]

Fuente: Tomado de las hojas técnicas de los integrados (12) y (13)

La lógica de control de los integrados 4052 y ADG509A de la adquisición de temperaturas se explicará más adelante en el capítulo de desarrollo del programa de control. A continuación se especifica más profundamente cada uno de los sensores de temperatura:

2.4.1.1 Sensor para temperatura T_1

Esta temperatura es aquella de la entrada de suministro de agua fría por lo que el sensor de temperatura que la mide forma parte del sensor de flujo de la serie FP7001A. Este sensor de flujo posee en su interior un sensor de circuito integrado de temperatura con una salida variable de voltaje en función de la temperatura que este midiendo, teniendo como características principales especificadas en la **Tabla 2.10**.

Tabla 2.10 Características del sensor de temperatura del FP7001A

Característica	Rango	Unidad
<i>Rango</i>	2 a 150	[°C]
<i>Precisión</i>	+ - 1	[°C]
<i>Salida</i>	10	[mV/°C]
<i>Alimentación</i>	5 a 18 V_{DC}	[V_{DC}]

Fuente: Tomado de la hoja técnica (20)

La salida de temperatura del sensor FP7001A se transmite a un amplificador no inversor implementado utilizando el circuito integrado amplificador operacional TL082.

Posteriormente la señal amplificada pasa al circuito integrado 4052 que cumple con la función de multiplexor análogo comandado por el microcontrolador del subsistema de adquisición. Después, teniendo en cuenta que la temperatura máxima que mide el sensor T1 es de 100 [°C], se amplifica la señal de voltaje al rango de 0 a 5.2 [V_{DC}]. La señal adquirida por el microcontrolador según el programa de control llega directamente al convertor análogo digital ya amplificada. El siguiente circuito de la **Figura 2.9** muestra el circuito de acondicionamiento para el sensor de temperatura FP7001A, donde se encuentra las etapas de amplificación, conmutación analógica y conversión analógica digital.

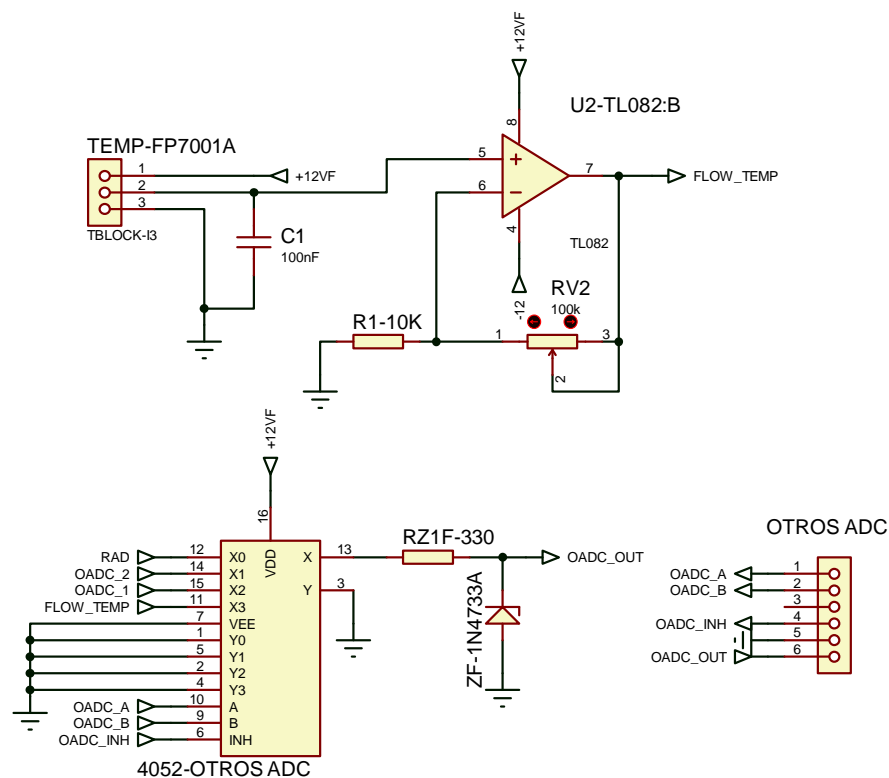


Figura 2.9 Diagrama circuital del circuito de acondicionamiento para el sensor de temperatura de FP7001A

Los colores de las terminales correspondientes de la salida de voltaje de la temperatura del sensor de flujo FP 7001A se encuentran en la respectiva hoja técnica y en manual de usuario.

2.4.1.1.1 Ecuación para el acondicionamiento del sensor para temperatura T_1

El voltaje entregado por el sensor de temperatura del FP7001A es una relación entre la temperatura al cual está el dispositivo y la resolución del mismo que es de 10 [mV/°C]. Posteriormente este voltaje es amplificado para tener los voltajes dentro del rango de operación entre 0 [°C] y 100 [°C]. Este voltaje es adquirido por el conversor analógico digital del microcontrolador del subsistema central de adquisición.

Se parte de la siguiente relación, que es explícitamente la temperatura multiplicada por la resolución del sensor:

$$V_{\text{sensor}} = 0.01T_1 \quad (2.1)$$

A este voltaje del sensor se amplifica con una ganancia tal que el valor más alto de temperatura que se desea medir cumpla con el valor más alto de la conversión. Es así que para 5.2 [V_{DC}] se divide para el voltaje entregado por el sensor a 100 [°C] que es 1 [V_{DC}], obteniendo:

$$G_{T1} = \frac{5.2 \text{ [VDC]}}{1 \text{ [VDC]}} = 5.20 \quad (2.2)$$

Esta ganancia se multiplica al voltaje entregado por el sensor T_1 y se obtiene la siguiente relación del voltaje amplificado:

$$V_{\text{Amplificado}} = V_{\text{sensor}} G_{T1} \quad (2.3)$$

Este valor de voltaje ingresa al conversor análogo digital de 10 bits. Para 5.2 [V_{DC}] el valor numérico decimal numérico que entrega el conversor es de 1023 por lo que la resolución del conversor A/D es 5.08 [mV] por cada bit. Por tanto el valor del ADC³ es el siguiente:

³Analog Digital Conversor

$$\text{Valor}_{ADC} = \frac{V_{\text{Amplificado}}}{0.00508} \quad (2.4)$$

Con las ecuaciones anteriores se obtiene el valor de temperatura que se representa en la ecuación final ingresada al microcontrolador del subsistema de visualización y a la interfaz hombre-máquina del LabView, siendo:

$$T_1 = \frac{\text{Valor}_{ADC} (0.00508)}{C_{T_1} (0.01)} \quad (2.5)$$

2.4.1.2 Sensores para temperaturas T_2 , T_3 , T_4 , T_5 , T_6 y extras

Como se especificó anteriormente las temperaturas T_2 , T_3 , T_4 , T_5 , T_6 corresponden a las temperaturas de salida de suministro de agua caliente, entrada al colector, salida del colector, superficial superior de la placa del acumulador y superficial inferior de la placa del acumulador respectivamente. Tienen en común que la señal analógica proviene de termocuplas tipo J con la salida a $51.7 \text{ } [\mu\text{V}/^\circ\text{C}]$ (22).

Se escoge esta termocupla por su mayor sensibilidad de voltaje al cambio de temperatura. Otro motivo para la selección de este transductor es su idoneidad en la colocación, siendo el caso que para la placa del colector se monta una termocupla con forma de orquilla y para la tubería, una termocupla con forma de vaina. Existe también la posibilidad de la extensión del cable conductor apantallado para la termocupla. Para el acondicionamiento de estas termocuplas se consideró tres etapas como se detalló en el diagrama de bloques de la **Figura 2.8**, siendo las mismas las etapas de pre-amplificación, conmutación análoga, amplificación.

En la etapa pre-amplificación se utiliza el circuito integrado AD594 que es un amplificador de voltaje para termocuplas tipo J, que posee una ganancia de 193.4 propia para estas termocuplas, dando una salida de $10 \text{ } [\text{mV}/^\circ\text{C}]$ (13). El voltaje generado por el integrado AD594 es recogido por el multiplexor análogo ADG509A.

En la etapa de conmutación análoga se utiliza el circuito integrado multiplexor ADG509A que tiene una capacidad de 4 entradas diferenciales, por lo que cuatro de las cinco temperaturas son cubiertas. Así mismo se utiliza un integrado

adicional para la temperatura T_6 restante y para las entradas de temperaturas extras T_7 , T_8 y T_9 .

La lógica de control de ambos integrados es coordinada por el microcontrolador del subsistema de adquisición donde la lógica para su control se especificará en el capítulo siguiente.

El amplificador no inversor escogido implementado con el circuito integrado TL082 tiene un alto rechazo al ruido y es de alta velocidad. Adicionalmente el amplificador posee las resistencias de precisión para la calibración de la ganancia respectiva.

Se utilizaron conectores tipo J hembra de montaje en placa para la recepción de los conectores que tienen los cables extensores tipo J a los cuales se conectan las termocuplas ubicadas en distintos puntos del sistema solar termosifón.

El circuito electrónico impreso que contiene el circuito descrito anteriormente se encuentra en la placa de "Termocuplas". Las señales generadas por las termocuplas llegan a cada terminal con su respectiva nomenclatura, donde cada una es recibida por un amplificador AD594 y según el programa de control pasará la señal de cada AD594 al multiplexor ADG509A y por último esta señal llega al amplificador no inversor.

La señal tratada pasará al pin de conversor análogo digital del microcontrolador del subsistema de adquisición para su digitalización. El capacitor de 10 [nF] es para un filtro interno del circuito integrado AD594 para filtrar frecuencia y el led dispuesto, sirve para la indicación de presencia o ausencia de conexión de termocupla. De manera similar se colocan dos zener a la salida de cada amplificador para proteger al microcontrolador del subsistema de adquisición.

La **Figura 2.10** se muestra el diagrama circuital para las temperaturas antes mencionadas.

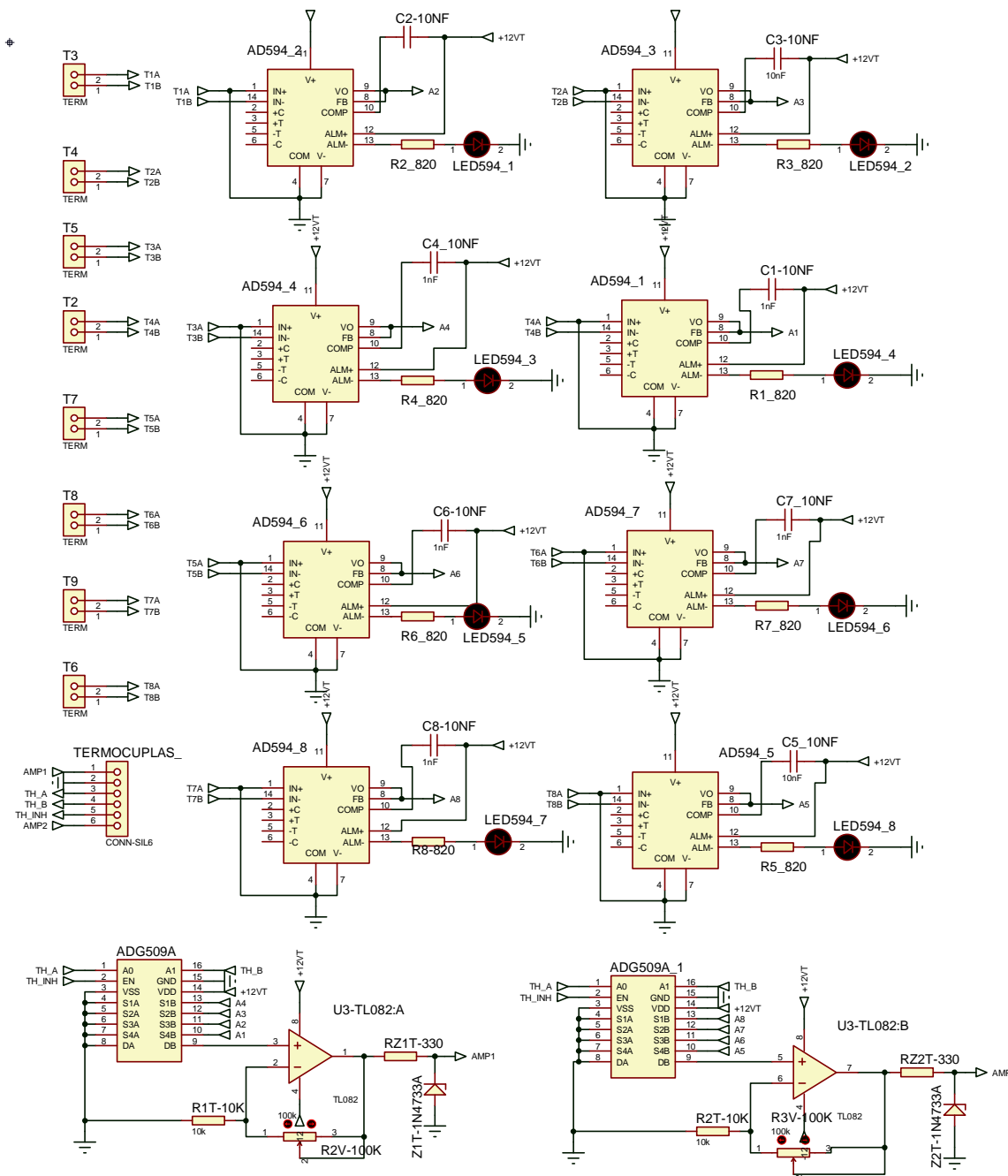


Figura 2.10 Diagrama circuital para el acondicionamiento de las termocuplas tipo J

2.4.1.2.1 Ecuación para acondicionamiento de termocuplas

Las termocuplas son transductores que dependiendo de la temperatura de la junta proporcionan un voltaje. Para la termocupla tipo J se tiene un voltaje de $51.7 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$, por lo que se consigue la primera relación:

$$V_{\text{Termocupla}} = \text{Temperatura} * (51.7E - 6) \quad (2.6)$$

El voltaje proporcionado por la termocupla ingresa al amplificador monolítico AD594 que entrega una ganancia de 193.4 para tener una salida normalizada de 10 [mV/°C]. Es así que para obtener el voltaje del amplificador el fabricante entrega una relación que viene dada por:

$$V_{\text{AD594}} = (V_{\text{Termocupla}} + 16E - 6) * 193.4 \quad (2.7)$$

Este voltaje es entregado en la salida normalizada antes mencionada, pero para cubrir todo el rango del conversor análogo digital fue necesario amplificarlo. Debido a esta amplificación la ganancia obtenida viene dada por el rango máximo de 150 [°C] que alcanza a un voltaje del amplificador AD594 de 1.503 [V], por lo que la división para el voltaje de referencia es:

$$G_T = \frac{5.2 \text{ [VDC]}}{1.503 \text{ [VDC]}} = 1.946 \quad (2.8)$$

El voltaje amplificado quedaría multiplicado por la ganancia obtenida anteriormente siendo:

$$V_{\text{Amplificado}} = V_{\text{AD594}} * G_T \quad (2.9)$$

Este voltaje ingresa al conversor A/D del microcontrolador del subsistema de adquisición donde para la resolución de 5.08 [mV] se adquiere el valor decimal equivalente dado por:

$$\text{Valor}_{\text{ADC}} = \frac{V_{\text{Amplificado}}}{0.00508} \quad (2.10)$$

Por lo tanto la ecuación final se obtiene del manejo de las ecuaciones anteriores por lo que el despejando se obtiene el valor de temperatura para el ingreso al microcontrolador del subsistema de visualización y de la interfaz hombre - máquina quedando:

$$\text{Temperatura} = \frac{\text{Valor}_{\text{ADC}} * 0.00508}{G_T * 193.4 * 51.7E - 6} - \frac{16E - 6}{51.7E - 6} \quad (2.11)$$

2.4.1.3 Sensor para temperatura ambiente T_A

Para la temperatura T_A que es la correspondiente a la ambiente se utiliza el sensor de temperatura y humedad SHT15 de la familia Sensiron. El sensor se escogió porque que garantiza una excelente fiabilidad y estabilidad a largo plazo, asimilado perfectamente por el sistema de adquisición del presente trabajo. La adquisición y conversión analógica de las señales de temperatura y humedad las realiza el mismo sensor entregando una salida digital de 14 bits receptada directamente por el microcontrolador del subsistema de adquisición a través de la comunicación serial de 2 hilos (14). Las características del sensor SHT15 para temperatura se presentan en la **Tabla 2.11**.

Tabla 2.11 Características del sensor SHT15 para temperatura

Parámetro	Mínimo	Típico	Máximo	Unidad
Alimentación (V_{DD})	2.4	3.3	5.5	[V _{DC}]
Salida de voltaje en alto nivel	90% V_{DD}		100% V_{DD}	
Resolución	0.04	0.01	0.01	[°C]
	12	14	14	bit
Precisión		+ - 0.3		[°C]
Repetitibilidad		+ - 0.1		[°C]
Rango de Medida	-40		123.8	[°C]

Fuente: Tomado de la hoja técnica (14)

El circuito esquemático del sensor se detalla en la **Figura 2.11**.

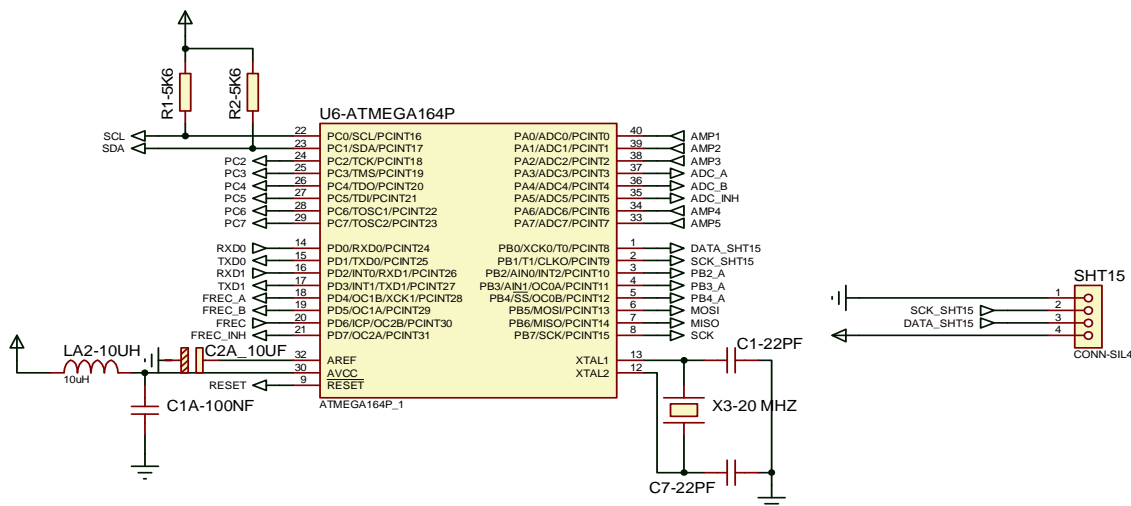


Figura 2.11 Diagrama circuital para el sensor SHT15

2.4.1.3.1 Ecuación para acondicionamiento

El microcontrolador ATmega 164PA del subsistema de central de adquisición a través de la comunicación de dos hilos adquiere la señal digital del sensor SHT15. La ecuación dada por el fabricante para el cálculo de la temperatura se tiene en la Ecuación 4.16 (14):

$$T = d_1 + d_2(SO_T) \tag{2.12}$$

Donde,

$$d_1 = -40.1 (5 [V])$$

$$d_2 = 0,04(12 \text{ bit})$$

$$SO_T = \text{Valor en 12 bits entregado por el sensor}$$

2.4.2 SENSORES DE HUMEDAD

La medición de la humedad presente en distintos puntos del sistema, son parámetros importantes para evaluar el desempeño de un sistema solar termosifón, de tal forma que se toman dos medidas:

- La humedad relativa propia del ambiente donde se encuentra ubicado el colector térmico solar y el sistema de adquisición.
- La humedad relativa dentro de la cámara del colector térmico solar, esto es, entre la placa del acumulador del colector y el vidrio protector externo.

La humedad relativa ambiente es tomada por razones informativas para constatar bajo que parámetros de humedad trabaja tanto el colector o captador como el sistema de adquisición de datos.

La humedad relativa dentro de la cámara es tomada para la comprobación de alguna fuga existente en la tubería del colector ubicada bajo la placa del acumulador, o una falla en el sellamiento del colector que estaría permitiendo la entrada de agua a la cámara del colector.

Los principios de acondicionamiento para los sensores que miden las humedades descritas vienen dados según su tipo. Adicionalmente, se coloca la nomenclatura respectiva para cada humedad de cada sensor en la **Tabla 2.12**.

Tabla 2.12 Sensores de Humedad

Humedad	Nomenclatura	Sensor	Salida	Rango de Operación
Cámara	H ₁	HTF3223	Frecuencia	0 a 99 [% RH]
Ambiental	H _A	SHT15	Digital	0 a 100 [% RH]

Fuente: Tomado de las hojas técnicas (14) y (15)

La **Figura 2.12** detalla el diagrama de bloques para la adquisición de ambas humedades:

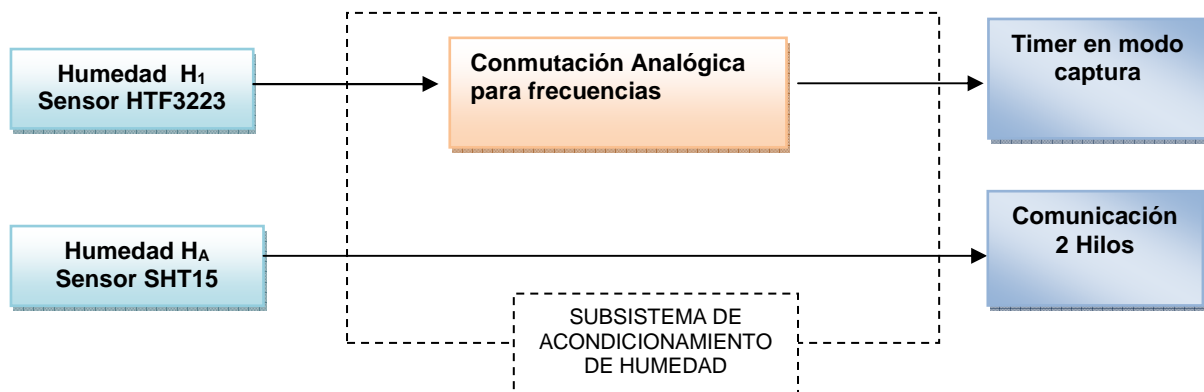


Figura 2.12 Diagrama de Bloques para adquisición de humedades

Una vez realizado el diagrama de bloques seguidamente se profundiza en las características de cada sensor de humedad.

2.4.2.1 Sensor para humedad H_1

Descrito anteriormente, la humedad dentro de la cámara es obtenida por el sensor HTF3223, que es un módulo basado en el sensor capacitivo de humedad HS1101. Este módulo permite la adquisición y el acondicionamiento del sensor antes mencionado porque la humedad es traducida a una señal de frecuencia y el microcontrolador del subsistema central de adquisición la recoge a través del timer en modo captura. El sensor de humedad se seleccionó por estas características:

- Instantánea desaturación después de largos periodos en fase de saturación.
- Rápida respuesta de tiempo
- Alta resistencia a químicos
- No es afectada bajo la inmersión en el agua. (15)

La curva de operación del sensor se muestra en la **Figura 2.13** donde, de acuerdo a pruebas experimentales, el mismo está operando dentro de los parámetros recomendados de temperatura y humedad. Dentro de la cámara se tiene una temperatura máxima de 70 [°C] y una humedad relativa máxima del 40%

a las 12h00, a pleno sol, por lo que la operación del sensor según la curva es ideal:

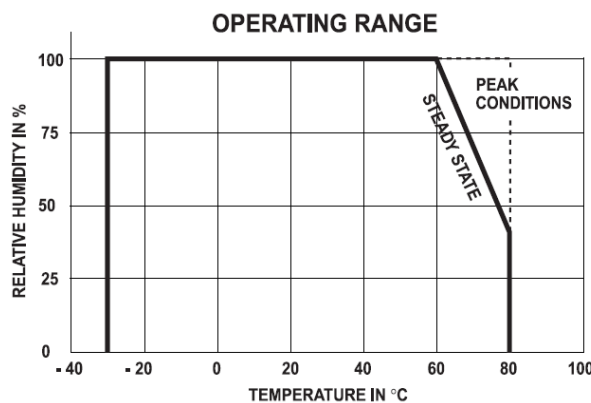


Figura 2.13 Curva de operación. Humedad vs Temperatura (15)

Las características más pertinentes del sensor se detallan en la **Tabla 2.13**.

Tabla 2.13 Sensores de Humedad

Parámetro	Símbolo	Mínimo	Típico	Máximo	Unidad
Rango de metrología	RH	10	-	95	[% RH]
Precisión de la Humedad	RH		± 5	± 10	[% RH]
Alimentación de voltaje	V _S	4.75	5	5.25	[V _{DC}]
Frecuencia de salida	F _{OUT}	9560		8030	[Hz]

Fuente: Tomado de hoja técnica (15)

Como se demuestra en la tabla, el rango de metrología de la humedad varía entre el 10% al 95% de la humedad relativa por lo que la respuesta de frecuencia cambia según la ecuación $F_{out} = 9740 - 18 \cdot RH$ dada por el fabricante donde los valores mínimo y máximo son referidos a la misma (15). Descritas las etapas, el diagrama circuital se presenta de la siguiente forma en la **Figura 2.14**:

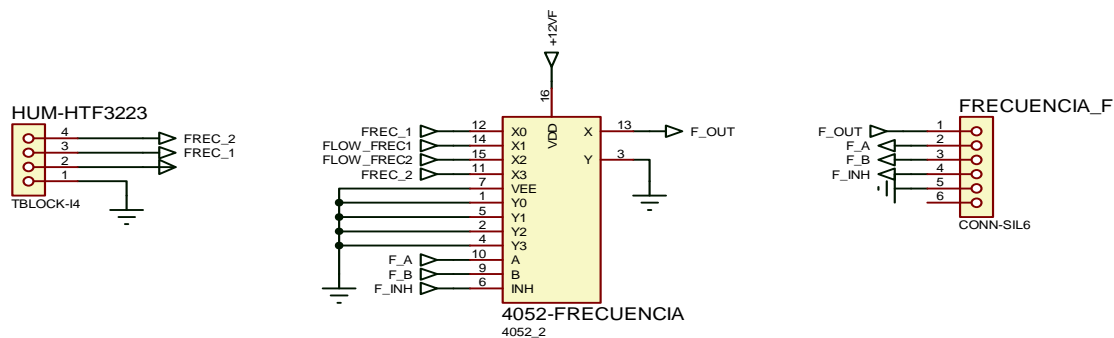


Figura 2.14 Diagrama Circuital del Sensor HTF3223

2.4.2.1.1 Ecuación para acondicionamiento del sensor para la humedad H_I

El microcontrolador del subsistema central de adquisición adquiere la señal de frecuencia que viene dada por el sensor HTF3223 para la cual el fabricante utiliza la **Ecuación 3.13** para relacionar la frecuencia con la humedad (15).

$$F_{OUT} = 9740 - 18 * RH \quad (2.13)$$

Despejando la humedad relativa de la ecuación anterior se obtiene:

$$RH = \frac{9740 - F_{OUT}}{18}$$

Siendo esta la ecuación para encontrar la humedad relativa.

2.4.2.2 Sensor para humedad H_A

Previamente en el literal 2.4.1.3 se especificó algunas características del sensor SHT15 que entrega una señal digital en una trama de bits tanto de temperatura como de humedad, siendo el caso presente el de humedad. Las especificaciones de operación bajo este parámetro se especifican en la **Tabla 2.14** (14).

Tabla 2.14 Características del sensor SHT15 para Humedad

Parámetro	Mínimo	Típico	Máximo	Unidad
Resolución	0.4	0.05	0.05	[%RH]
	8	12	12	bit
Precisión		+/- 2		[%RH]
Repetitibilidad		+/- 0.1		[%RH]
Rango de Operación	0		100	[%RH]

Fuente: Tomado de hoja técnica (14)

El diagrama circuital se encuentra especificado en la **Figura 2.11** por lo que solo se difiere en el programa de control del microcontrolador de adquisición donde trama de datos recibida es según el comando enviado para temperatura o humedad. La curva de operación se muestra en la **Figura 2.15** siendo:

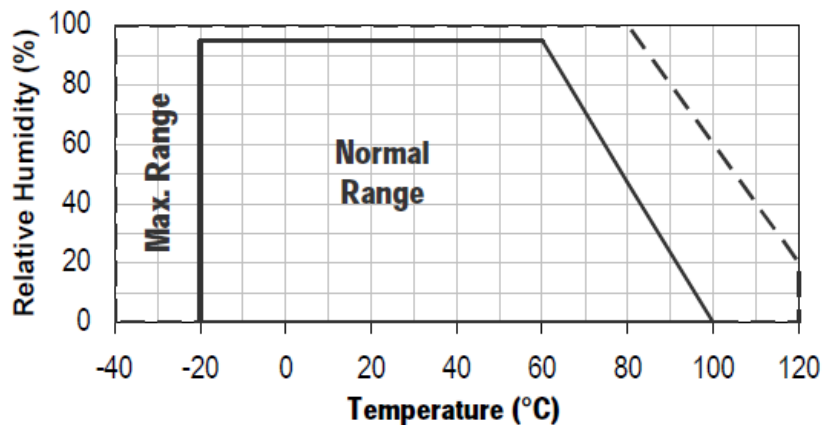


Figura 2.15 Curva de operación del sensor SHT15 para Humedad (14)

2.4.2.2.1 Ecuación para acondicionamiento del sensor para la humedad H_A

El microcontrolador ATmega 164PA adquiere la señal digital del sensor SHT15. La ecuación dada por el fabricante para el cálculo de la humedad es la siguiente:

$$RH_{LINEAL} = c_1 + c_2(SO_{RH}) + c_3(SO_{RH})^2 \quad (2.14)$$

Donde,

$$c_1 = -2,0468$$

$$c_2 = 0,0367$$

$$c_3 = -1,5955E-6$$

SO_{RH} = Valor en 12 bits entregado por el sensor

Para la compensación de la humedad por la temperatura, el fabricante sugiere la siguiente ecuación:

$$RH_{VERDADERA} = (T_{°C} - 25)(t_1 + t_2(SO_{RH}) + RH_{LINEAL}) \quad (2.15)$$

Donde,

$$t_1 = 0,01$$

$$t_2 = 0,00008$$

T_c = *Temperatura calculada de la señal del sensor SHT15*

2.4.3 SENSOR DE RADIACIÓN

La medición de radiación requirió inicialmente la determinación del rango de variación de la radiación para la ciudad de Quito. Luego el sensor escogido fue el sensor de radiación solar 6450 de la serie Vantage Pro2 que mide la radiación total, esto es la suma en un punto de las componentes tanto directa como difusa de la irradiancia solar. Las características del sensor se presentan en la **Tabla 2.15**.

Tabla 2.15 Características del Sensor de Radiación Solar 6450

Parámetro	Valor	Unidad
Temperatura de Operación	-40 a 65	[°C]
Respuesta Espectral	400 a 1100	[nm]
Alimentación de voltaje	+3 (+/-10%)	[V _{DC}]
Respuesta de Salida	1.67	[mV por W/m ²]
Resolución	1	[W/m ²]
Rango de medición	0 - 1800	[W/m ²]
Precisión (De la Escala Completa)	± 5	[%]

Fuente: Tomado de la hoja técnica (16)

El sensor escogido es adecuado para el rango de radiación solar existente en la ciudad de Quito. Según los datos recogidos en la **Tabla 1.3** muestran valores máximos que llegan a una radiación de promedio mensual 1200 [W/m²] pero existen picos más elevados de radiación que llegan hasta los 1600 [W/m²]. Este valor es necesario para el cálculo de eficiencia del sistema.

Las pantallas externas del cuerpo del sensor proporcionan una ruta de flujo de aire para enfriamiento por convección del cuerpo, reduciendo al mínimo el calentamiento del interior del sensor. Se incluye un anillo de corte para la respuesta del coseno, un indicador de nivel, y aletas para ayudar a alinear el sensor con los rayos del sol. El espacio entre el escudo y el cuerpo también proporciona una vía de escurrimiento de agua, reduciendo la posibilidad de lluvia

atrapada. El difusor está soldado al cuerpo con un sello hermético, el cual proporciona una respuesta excelente. El transductor es un fotodiodo de silicio herméticamente cerrado, el amplificador incluido convierte el transductor de voltaje de 0 a 2.5 [V_{DC}] (16). Adicionalmente los tornillos de montaje con muelle, junto con el indicador de nivel, permiten la nivelación rápida y precisa del sensor. El sensor está calibrado bajo una norma secundaria que se calibra periódicamente contra un Piranómetro Eppley de precisión espectral en la luz natural del día (16). El diagrama de bloques representativo para la toma de esta señal es ubicado en la **Figura 2.16**.

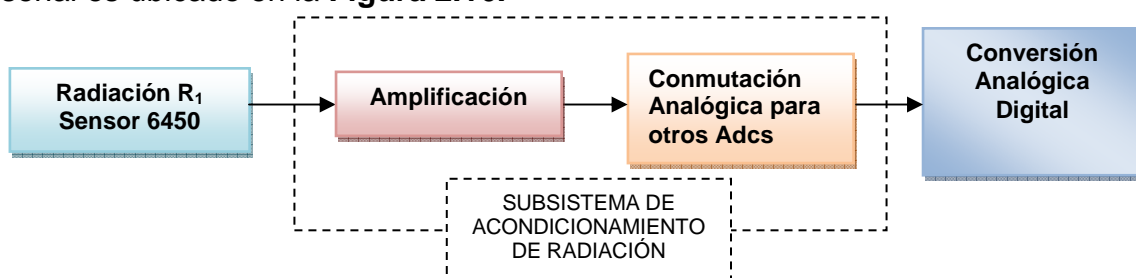


Figura 2.16 Diagrama de Bloques para adquisición de Radiación

El diagrama circuital para este sensor viene dado en la **Figura 2.17**. Donde se muestran las etapas antes indicadas con la amplificación a través del circuito integrado TL082 y la conmutación con el integrado 4052.

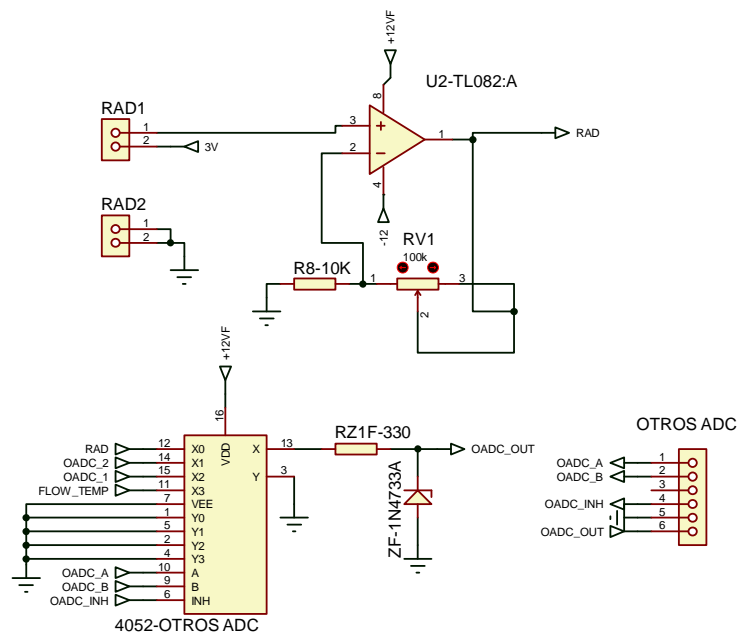


Figura 2.17 Diagrama Circuital del Sensor de Radiación Solar 6050

2.4.3.1 Ecuación para el acondicionamiento del sensor para la radiación R_1

El sensor de radiación 6450 entrega una señal de voltaje dependiendo del valor de radiación incidente al mismo. El microcontrolador del subsistema central de adquisición utiliza el conversor analógico digital para manejar esta señal que a su vez se encuentra amplificada.

Se parte que el sensor entrega un valor de 1.67 [mV] por [W/m²] siendo este voltaje:

$$V_{\text{sensor}} = \text{Radiación} * (1.67E - 3) \quad (2.16)$$

Al valor de voltaje obtenido por el sensor se lo amplifica de tal manera que para el valor de 1600 [W/m²] que es el valor máximo de radiación en Quito se lo amplifique a 5.2 [V_{DC}]. De esta manera la ganancia referida es:

$$G_{\text{RAD}} = \frac{5.2 \text{ [VDC]}}{2.72 \text{ [VDC]}} = 1,946 \quad (2.17)$$

Por lo que el voltaje del sensor multiplicado por esta ganancia de amplificación resulta la siguiente ecuación del voltaje amplificado:

$$V_{\text{Amplificado}} = V_{\text{sensor}} * G_{\text{RAD}} \quad (2.18)$$

Previamente se especificó que el valor de conversión del A/D es de 5,08 [mV] por bit, donde se alcanza que el valor numérico decimal del conversor al voltaje colocado en el pin respectivo. Es así que el valor del ADC obtenido es:

$$\text{Valor}_{\text{ADC}} = \frac{V_{\text{Amplificado}}}{0,00508} \quad (2.19)$$

Realizando el tratamiento de las ecuaciones para obtener el valor de radiación se encuentra la **Ecuación 4.24** es ingresada tanto para el microcontrolador del subsistema de visualización como para la interfaz hombre-máquina del LabView.

$$\text{Radiación} = \frac{\text{Valor}_{\text{ADC}} * 0,00508}{G_{\text{RAD}} * 1.67E - 3} \quad (2.20)$$

2.4.4 SENSOR DE CONDUCTIVIDAD

Para la adquisición de la variable de conductividad se escogió el sensor SC4A. Este sensor esta destinado para las aplicaciones de baja conductividad ya sea en aplicaciones para electricidad, agua o para la industria farmacéutica, presentando un estilo compacto y con varias posibilidades de montaje. Adicionalmente está fabricado en base a una combinación de materiales aprobado por la FDA (Food and Drug Administration) siendo ideal para el control de los sistemas de agua pura. La constante de celda esta calibrado bajo el método de ASTM según la NIST (National Institute of Standards for Technology). (17)

La notación del sensor de conductividad SC4A-S-SB-NN-002-05-T1 del fabricante Yokogawa se presenta a continuación en la **Tabla 2.16** y las especificaciones de operación se tienen en la **Tabla 2.17**. El sistema de medición se basa en 2 electrodos con 4 líneas de salida.

Tabla 2.16 Notación del Sensor de Conductividad SC4A

Parámetro	Sufijo	Descripción
Material	S	Acero Inoxidable
Tipo de Montaje	SB	1-1 ¹ / ₂ " abrazadera triple
Tamaño del cable	NN	Longitud fija
Constante de celda	002	0.02 / cm
Longitud de Cable	05	5 metros
Transductor de temperatura	T1	PT1000

Fuente: Tomado de la hoja técnica (17)

Tabla 2.17 Especificaciones operativas del Sensor SC4A

Parámetro	Valor	Unidad
Presión Máxima	142 (10)	[PSIG (bar)]
Temperatura Máxima	110	[°C]
Esterilización	135	[°C]

Respuesta de Temperatura	< 1	min (90% de la respuesta paso)
--------------------------	-----	---------------------------------

Fuente: Tomado de la hoja técnica (17)

La curva de operación presión en función de la temperatura del sensor se observa de la **Figura 2.18**, donde para un montaje con acero inoxidable se tiene la curva demarcada con SS y para un montaje con PVDF (fluoruro de polivinilideno).

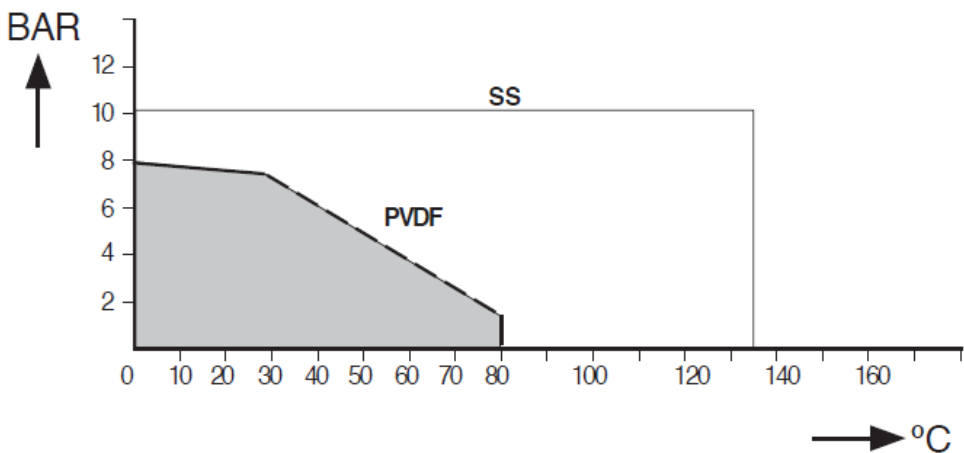


Figura 2.18 Curva de Operación. Sensor de Conductividad SC4A (17)

El rango de medición de conductividad del sensor SC4A se tiene en la **Figura 2.19**. Por lo que la medición de conductividad variara entre 0.03 $\mu\text{S/cm}$ hasta 800 $\mu\text{S/cm}$.

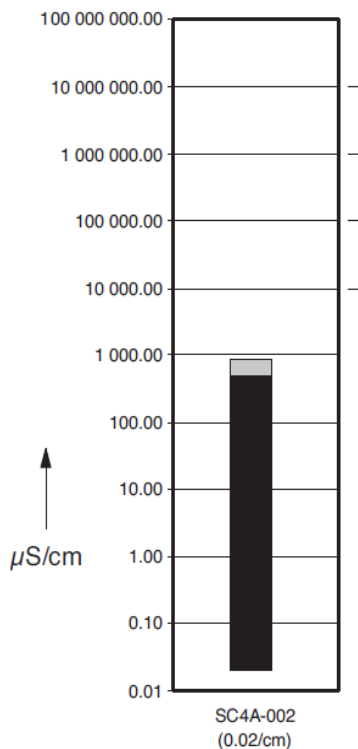


Figura 2.19 Rango de Conductividad del Sensor SC4A (17)

Los datos entregados por la Empresa Metropolitana de Agua Potable y Alcantarillado demuestran una variación del agua potable de Quito entre 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 220 $\mu\text{S}/\text{cm}$ según mediciones tomadas en las diferentes plantas de tratamiento de agua en el mes de Diciembre del 2010. Siendo un sensor adecuado para la toma de estos rangos de conductividad (39).

2.4.4.1 Acondicionamiento del sensor de conductividad

El sensor de conductividad mide la capacidad de una solución de conducir una corriente eléctrica entre dos electrodos por lo que está midiendo realmente la conductancia, definida como el recíproco de la resistencia. El acondicionamiento y adquisición del sensor por lo tanto depende del tratamiento de las señales para que la resistencia que posea la solución junto con un divisor de tensión determine la conductividad de la misma a través de un algoritmo en el microcontrolador de la señal de voltaje.

La aplicación de la corriente alterna a los electrodos es necesaria para prevenir la migración completa de los iones a uno de los dos electrodos. Con cada ciclo de corriente alterna, la polaridad de los electrodos se invierte, la cual cambia alternadamente la dirección del flujo iónico por lo que cualquiera de los productos generados por la electrolisis durante la mitad positiva del ciclo son destruidos casi totalmente en la mitad negativa, manteniendo tanto a la solución como al electrodo sin cambios significativos.

El voltaje aplicado al divisor de tensión es en consecuencia alterno por lo que dependiendo del valor de resistencia de la solución va entregar un voltaje alterno el mismo que debe de ser rectificado y filtrado para que llegue al conversor analógico digital del microcontrolador del subsistema de adquisición.

Para el acondicionamiento del sensor y la adquisición de la señal se debe cumplir varias etapas la cuales se muestran en el diagrama de bloques de la **Figura 2.20**.

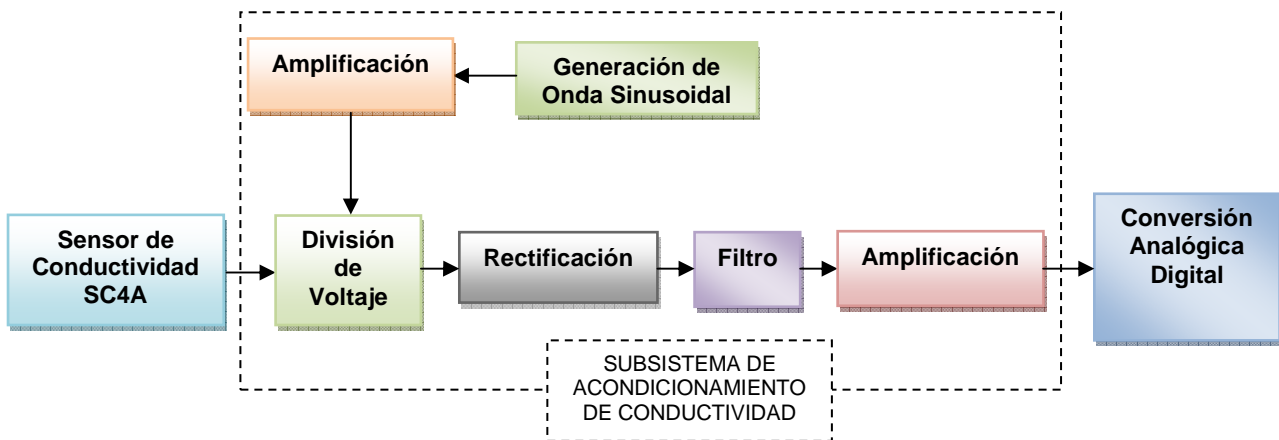


Figura 2.20 Diagrama de Bloques para el acondicionamiento y la adquisición de conductividad

2.4.4.1.1 Generación de Onda Sinusoidal

Un generador de onda alterna es un circuito que a través de un lazo de realimentación positiva genera una señal de salida sin tener una señal de entrada. La oscilación en un circuito con realimentación negativa no es una condición deseable pues un circuito debe ofrecer estabilidad en el mayor rango de frecuencias posibles, sin embargo en el caso de un circuito con realimentación positiva la señal de salida refuerza a la de entrada, con ello el circuito puede llegar a oscilar con una señal transitoria idealmente sin ninguna señal de entrada. Existen varios tipos de generadores de onda sinusoidal, sin embargo para la aplicación se requiere que tanto la forma como la amplitud y frecuencia de la onda sinusoidal sean sumamente estables (8).

Se escoge el circuito integrado de la serie XR – 2206 que es un generador de onda monolítico capaz de producir una onda seno de alta calidad como también ondas cuadrada, triángulo, la rampa, y formas de onda del pulso de alta estabilidad y precisión. Las formas de onda de salida se pueden modular en amplitud y frecuencia por un voltaje exterior. La frecuencia de operación puede ser seleccionada externamente en un rango de 0,01 [Hz] a más de 1 [MHz]. El circuito integrado que genera una onda sinusoidal de buenas características

siendo relevante que para la frecuencia recomendable (1 [kHz]) ofrece una distorsión armónica de 0.5%.

Algunas de las características de este circuito integrado se presentan en la **Tabla 2.18**.

Tabla 2.18 Características del Circuito Integrado XR2206

Parámetro	Mínimo	Típico	Máximo	Unidad
Voltaje de Alimentación	10		26	[V _{DC}]
Frecuencia Máxima de Operación	0.5	1		[MHz]
Precisión de Frecuencia		+/- 1	+/- 4	[%]
Distorsión de la Onda Sinusoidal		0.4	1	[%]

Fuente: Tomado de la hoja técnica (18)

El circuito recomendado por el fabricante para obtener una onda sinusoidal se demuestra en la **Figura 2.21**.

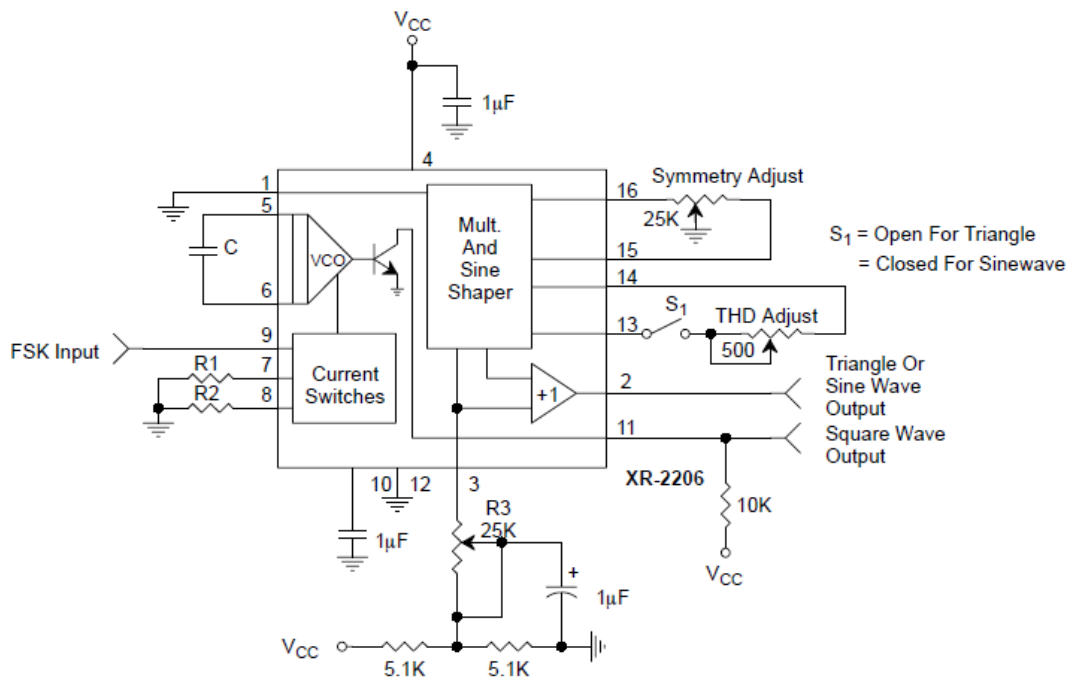


Figura 2.21 Diagrama circuital del Fabricante para generación de onda sinusoidal (18)

Los valores para la resistencia R_1 y el capacitor C sugeridos por el fabricante para una máxima operación de frecuencia son $R_1 = 1$ [k Ω] y para $C = 1000$ [pF] y para una operación en baja frecuencia los valores son $R_1 = 2$ [M Ω] y para $C = 50$ [μ F].

Para un valor medio de frecuencia de operación, siendo en este caso para 1000 [Hz], el valor elegido para C es 10 [nF]:

$$f = \frac{1}{RC} \quad (2.21)$$

Resolviendo la **Ecuación 2.1** para encontrar R se tiene que:

$$R = \frac{1}{fC} = \frac{1}{(1000[\text{Hz}]) * (10[\text{nF}])} = 100[\text{k}\Omega]$$

Por lo que se coloca un potenciómetro de 100 [k Ω].

La resistencia usada para calibrar la amplitud de la onda de salida es R_3 ajustada con un potenciómetro de 100 [k Ω]. Adicionalmente el valor de THD se ajusta con $R_A = 50$ [k Ω] y la simetría de la onda con $R_B = 1$ [k Ω], estos valores colocados entregan una mejor respuesta de la onda sinusoidal.

La salida del integrado XR2206 tiene un offset de alrededor de 6 voltios que se elimina colocando un capacitor de acoplamiento. Este capacitor debe tener una reactancia mucho menor que la impedancia de la siguiente etapa, donde se coloca un amplificador de ganancia mayor a uno, con una impedancia de entrada de 10[K Ω].

$$X_C \ll 10R_L$$

Donde:

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} = 10R_L$$

Despejando C se tiene que:

$$C = \frac{1}{20\pi f R_L} \quad (2.22)$$

Desarrollando la **Ecuación 2.2** se encuentra el valor mínimo de la capacitancia para que cumpla la condición antes mencionada siendo:

$$C = \frac{1}{20\pi(1000[Hz])(10[K\Omega])} = 1.60[nF]$$

Por lo que se escoge un capacitor electrolítico de 0.1 [μF] de un 10 [V_{DC}].

El diagrama circuital para la etapa de generación de onda alterna se muestra a continuación en la **Figura 2.22**.

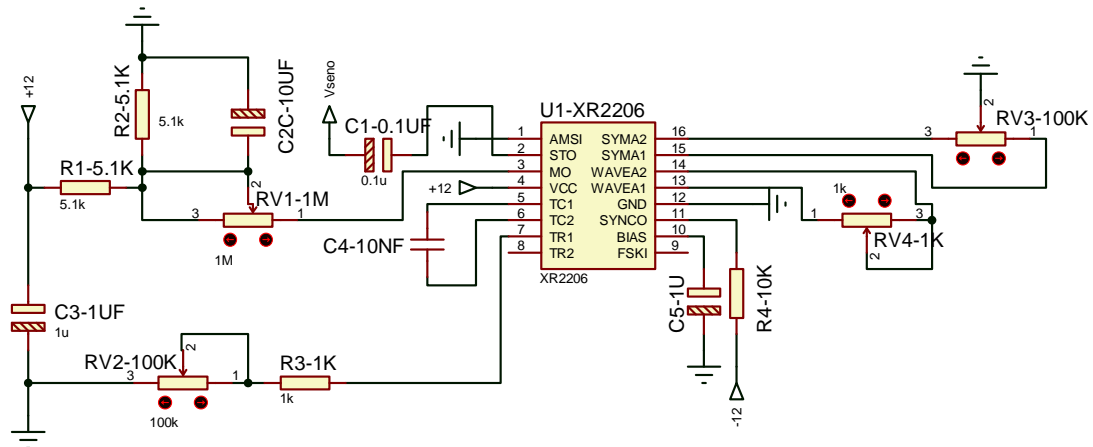


Figura 2.22 Diagrama circuital diseñado para generación de onda sinusoidal

2.4.4.1.2 Amplificación de Onda Sinusoidal

Se necesita que la onda sinusoidal de salida del oscilador sea un valor más alto por lo que se utiliza una etapa amplificadora a la salida del circuito integrado XR2206. Adicionalmente cumple como desacoplamiento entre el circuito integrado y el resto del circuito. El diagrama circuital se presenta en la **Figura 2.23**.

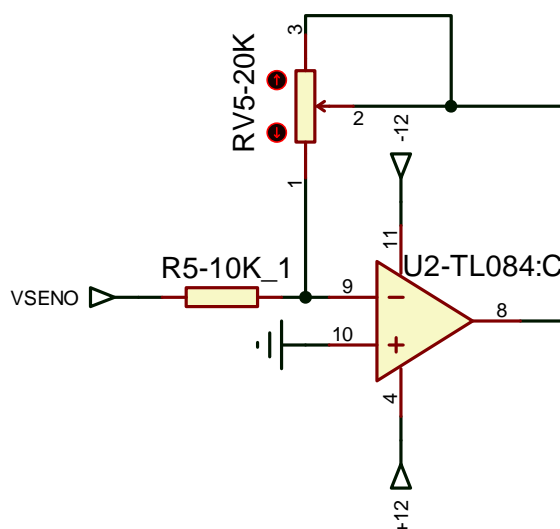


Figura 2.23 Diagrama circuital para amplificación de onda sinusoidal

El circuito de amplificación va conectado al circuito de generación de la onda sinusoidal a través de la señal V_{SENO} . Se coloca un potenciómetro para tener una amplitud variable que entra al divisor de voltaje.

2.4.4.1.3 División de voltaje

La división de voltaje a través de un puente de resistencias es un elemento importante en el acondicionamiento del sensor de conductividad SC4A, ya que define los valores del rango de medida de conductividad y su precisión.

Al aplicar un voltaje alterno a los electrodos del sensor, el modelo eléctrico de los mismos es una resistencia en serie a un capacitor. El valor de X_c es inversamente proporcional al valor de la capacitancia y de la frecuencia, dado que ambos valores son grandes, la reactancia capacitiva X_c se vuelve poco significativa. Así mismo al escoger un valor alto de resistencia, se minimiza el desfase entre el voltaje de alimentación al puente y el voltaje entregado por el puente.

El valor que toma la resistencia es el valor de resistencia óhmica de la solución, es decir, el inverso de la medida de conductancia, a partir de la cual se obtiene la conductividad de la solución que está en la celda. Tomando en cuenta el rango de medidas del sensor conductividad dado por el fabricante, el acondicionamiento ideal de medición de conductividad debería poder tomar medidas en todo ese

rango. De la **Figura 2.19**, el sensor trabaja entre $0.03 \mu\text{S/cm}$ hasta $800 \mu\text{S/cm}$, donde para una constante de celda $K = 0.02$, se tiene:

$$L = \frac{K}{R} \quad (2.23)$$

Donde L es la conductividad, K es la constante de la celda y R la resistencia de la solución.

Desarrollando la **Ecuación 2.3** se encuentran los valores mínimos y máximos de resistencia que es capaz de entregar el sensor, por lo que se tiene:

$$R_{\min} = \frac{K}{L_{\min}} = \frac{0.02[1/cm]}{0.03[\mu\text{S/cm}]} = 667[k\Omega]$$

$$R_{\max} = \frac{K}{L_{\max}} = \frac{0.02[1/cm]}{800[\mu\text{S/cm}]} = 25[\Omega]$$

El valor de referencia de resistencia para medir un a rango entre $0.03 [\mu\text{S/cm}]$ y $220 [\mu\text{S/cm}]$ es de $1 [k\Omega]$. Por lo que esta resistencia es conectada al sensor como se muestra en la **Figura 2.24**.

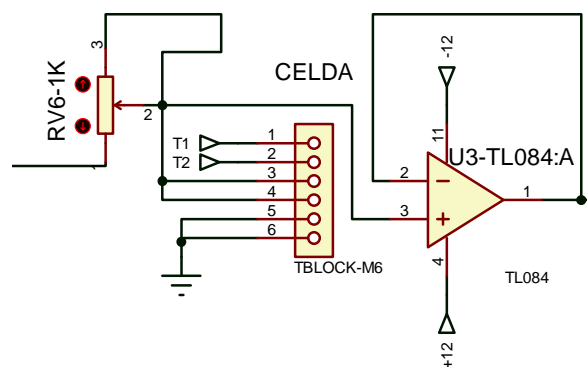


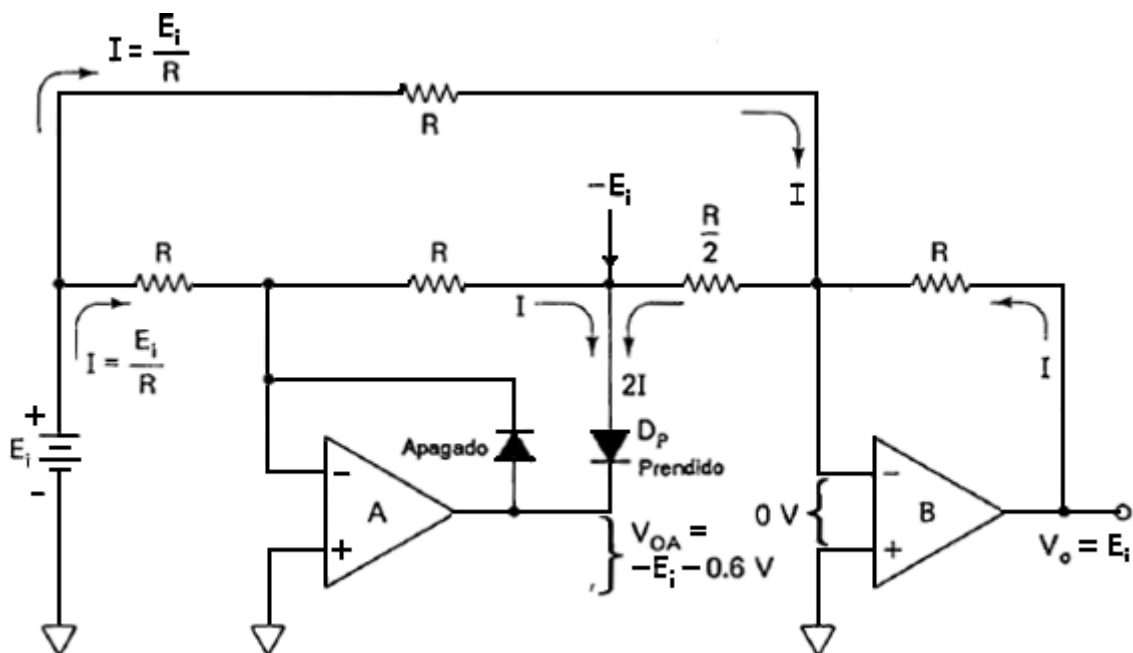
Figura 2.24 Diagrama circuital para división de voltaje

La señal sinusoidal entra al divisor de voltaje de tal manera que se tiene la resistencia de referencia que es un potenciómetro de $1 [k\Omega]$ y a continuación la bornera que sirve de conexión a los electrodos del sensor de conductividad SC4A. Adicionalmente la bornera posee dos conectores adjuntos para la conexión del sensor de temperatura PT1000 que sirve para la corrección de conductividad por temperatura.

Después para el acoplamiento a la siguiente etapa que es la de rectificación se coloca un amplificador seguidor.

2.4.4.1.4 Rectificación

La necesidad de utilizar una señal alterna como fuente de excitación para el puente de resistencias se determinó en los numerales anteriores, pero la señal para la etapa de conversión analógica a digital del microcontrolador de subsistema de adquisición requiere ser un valor DC. Una de las configuraciones para rectificar una onda alterna donde la salida no es afectada por la caída de voltaje sobre los diodos es el convertidor AC-DC, que se presenta en la **Figura 2.25**.



(a)

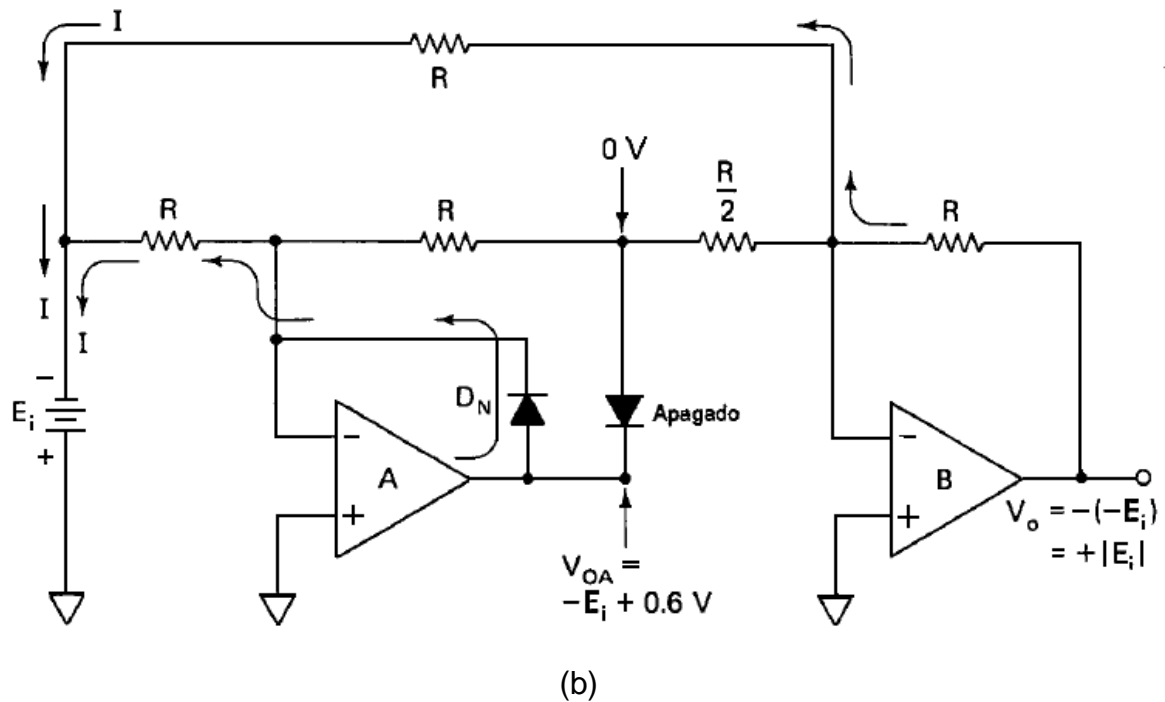


Figura 2.25 Diagrama circuital convertidor AC-DC de valor absoluto medio, Etapa Positiva (a), Etapa Negativa (b)(9)

Durante la etapa positiva donde la entrada de voltaje está el semiciclo positivo de la onda alterna, el amplificador operacional A invierte a la señal E_i , donde el amplificador operacional B trabaja como sumador inversor siendo que la salida V_o es igual a E_i . Durante la etapa negativa donde la entrada de voltaje está en el semiciclo negativo de la onda alterna, el amplificador operacional A rectifica la señal al valor 0 y el amplificador operacional B invierte la señal E_i siendo la salida V_o es igual a $+E_i$. Como consecuencia se tiene las siguientes formas de onda en la **Figura 2.26**.

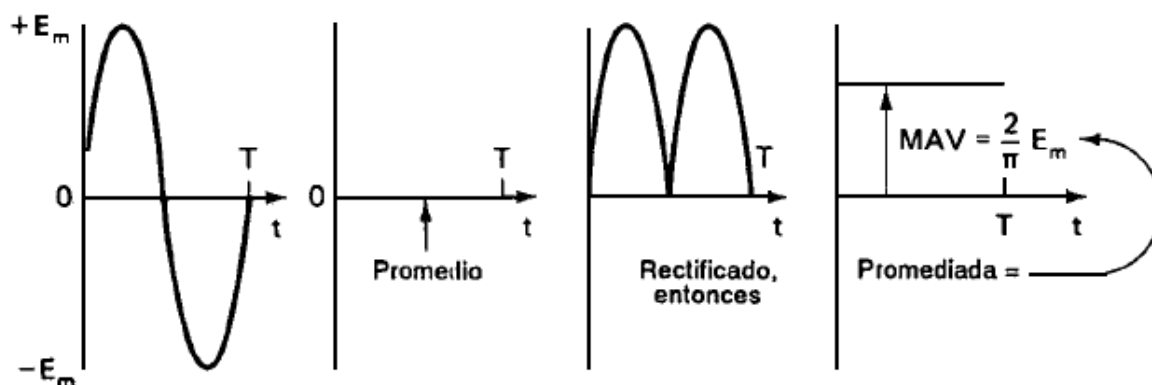


Figura 2.26 Formas de Onda del circuito de valor absoluto medio (9)

En las figuras anteriores se aprecia que existe un único valor de resistencia R para el diseño del circuito, por lo que se utiliza un acoplamiento de impedancias basado en un amplificador operacional TL084 (19).

La corriente típica permitida es de 1.8 [mA]. Analizando la **Figura 2.25** la corriente de salida del operacional A es mayor que la del B por lo que la corriente que restringe la condición máxima está dada en la **Ecuación 2.4**.

$$I_o = 3I = 3 \frac{E_i}{R} \quad (2.24)$$

El valor de E_i es el voltaje pico máximo de la onda seno de entrada al circuito, donde $E_i = 11[V_{DC}]$ para la condición más crítica por lo que:

$$R = 3 \frac{E_i}{I} = 3 \frac{11[V]}{2.8[mA]} = 12.86[k\Omega]$$

El valor de R debe ser divisible por 2 y por 3 y obtener valores estándar, por ello se escoge $R = 12 [k\Omega]$ (9).

El diagrama circuital se visualiza a continuación en la **Figura 2.27**.

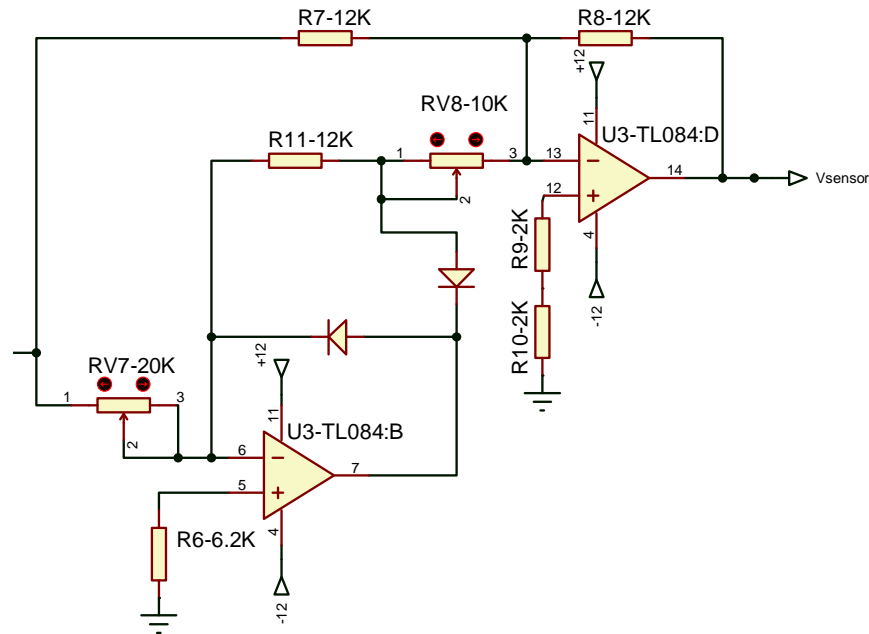


Figura 2.27 Diagrama Circuital del circuito de valor absoluto medio

Se colocan potenciómetros de precisión para calibración del circuito debido a las tolerancias de las resistencias.

La señal de salida del divisor de voltaje entra al rectificador por lo que la salida será una señal DC la cual pasa a la siguiente etapa de filtrado.

2.4.4.1.5 Filtro y Amplificación

El microcontrolador del subsistema de adquisición requiere un voltaje DC con poco rizado para poder efectuar una medición correcta, puesto que el microcontrolador visualizará el rizado se ha agregado a la salida del circuito rectificador un filtro pasabajos que garantice que el valor que convierta el conversor análogo digital sea el adecuado.

El filtro es un pasabajos Butterworth de segundo orden o de 60 decibelios por década. La frecuencia de corte del filtro es mucho menor que la frecuencia de la señal entregada por el circuito integrado XR2206, garantizando el paso de las componentes DC de la onda. Se ha elegido 10 [Hz] como frecuencia de corte (8).

El diagrama circuital dado para el filtro pasabajos de Butterworth se muestra en la **Figura 2.28**.

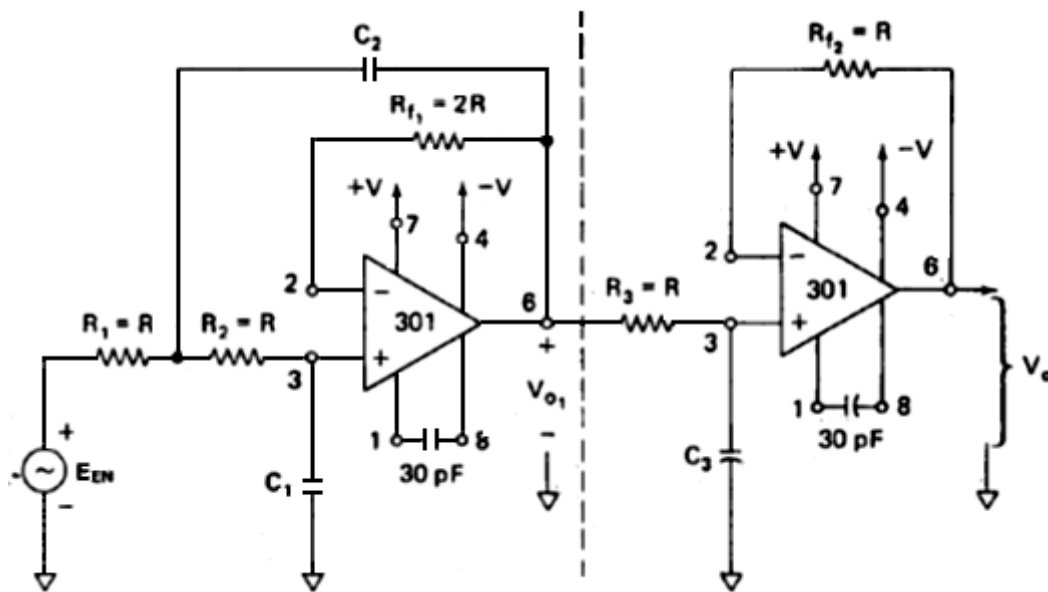


Figura 2.28 Filtro pasa bajos con una pendiente de -60dB/decada (9)

Mediante el método simplificado el capacitor escogido C_3 es de $0.1\text{ }[\mu\text{F}]$. Los capacitores C_1 y C_3 se tienen en las **Ecuaciones 2.25** y **2.26**.

$$C_1 = \frac{1}{2}C_3 \quad (2.25)$$

$$C_2 = 2C_3 \quad (2.26)$$

Por lo que para valores normalizados de capacitores se tiene que:

$$C_1 = \frac{1}{2}(0.1\text{ }[\mu\text{F}]) = 50\text{ }[\text{nF}] \approx 47\text{ }[\text{nF}]$$

$$C_2 = 2(0.1\text{ }[\mu\text{F}]) = 200\text{ }[\text{nF}] \approx 220\text{ }[\text{nF}]$$

Para el cálculo de la resistencia R se tiene la **Ecuación 2.27** siendo:

$$R = \frac{1}{2\pi f_c C_3} \quad (2.27)$$

Calculando la resistencia se tiene que:

$$R = \frac{1}{2\pi(10\text{ }[\text{Hz}])(0.1\text{ }[\mu\text{F}])} = 159.2\text{ }[\text{k}\Omega]$$

Para obtener resultados óptimos, el valor de R debe estar comprendido entre 10 y 100 [kΩ]. Se seleccionó para la resistencia R el valor de 100 [kΩ] y se procedió a recalcular la frecuencia de corte:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC_3} = \frac{1}{2\pi(100[K\Omega])(0.1[\mu F])} = 15.9 [Hz]$$

Por lo que la frecuencia dada es cercana a la frecuencia de corte inicial. Como los valores de R_1 , R_2 , y R_3 son iguales a R y esta tiene un valor de 100 [kΩ]. Para las resistencias R_{11} y R_{12} se tiene respectivamente 200 [kΩ] y 100 [kΩ]. (9)

El voltaje dado por el filtro es ampliado por el amplificador no inversor de la **Figura 2.29** el cual posee un potenciómetro para la respectiva calibración. Igualmente a la salida del amplificador se colocó un zener de protección. Finalmente el voltaje amplificado es transmitido hacia el pin del conversor análogo digital del microcontrolador del subsistema de adquisición.

El diagrama circuital implementado se encuentra en la **Figura 2.29**.

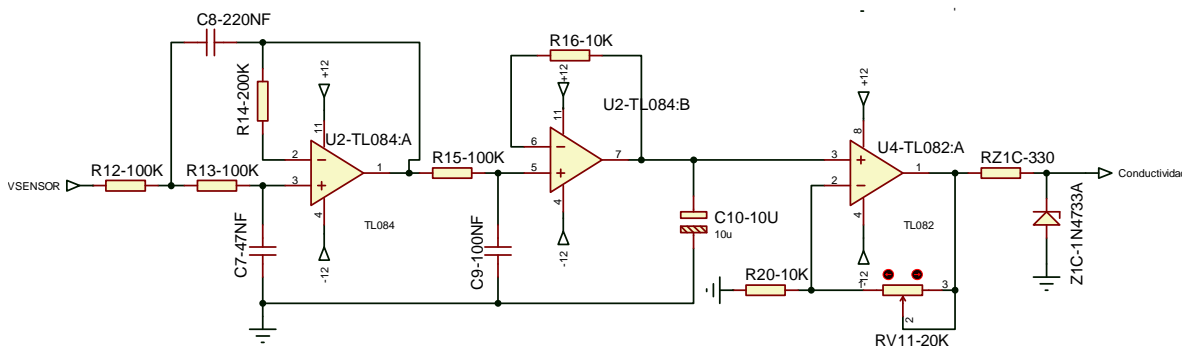


Figura 2.29 Diagrama circuital del Filtro pasa bajos y amplificador no inversor

2.4.4.2 Ecuación para el acondicionamiento del sensor para conductividad

Para la ecuación de conversión de la variable de conductividad se necesita revisar diferentes conversiones que parte desde la obtención de la resistencia ya que la conductividad es su inverso. A partir de la constante de celda de 0.02 [$\mu\text{S}/\text{cm}$] se tiene:

$$R_{COND} = \frac{\text{Conductividad}}{0.02} \quad (2.28)$$

A esta resistencia se ve aplicada a un divisor de voltaje, en serie con una resistencia R_{V6} de 680 [Ω]. El voltaje alterno pico-pico de 11 [V_{DC}] y de frecuencia de 1 [kHz], por lo que el voltaje obtenido queda expresado como:

$$V_{R_{COND}} = V_A \frac{R_{COND}}{R_{COND} + R_{Vs}} \quad (2.29)$$

Este voltaje es rectificado bajo la **Ecuación 2.31** donde hay que tomar en cuenta que el voltaje $V_{R_{COND}}$ es el voltaje pico-pico, por lo que el voltaje V_m se obtiene en

la **Ecuación 2.30**:

$$V_m = \frac{V_{R_{COND}}}{2} \quad (2.30)$$

$$V_{rect} = \frac{2}{\pi} V_m \quad (2.31)$$

Este voltaje debe ser multiplicado por un factor de amplificación para cubrir con el voltaje de referencia de la conversión analógica digital de 5.2 [V_{DC}]. El valor más alto de voltaje del divisor viene dado cuando la conductividad es de 20 [μS] con un voltaje de 2.08 [V_{DC}]. La ganancia consta de la **Ecuación 2.32**.

$$G_{COND} = \frac{5.2 [V_{DC}]}{2.08 [V_{DC}]} = 2.495 \quad (2.32)$$

Esta ganancia se multiplica al voltaje rectificado obteniéndose de esa forma el voltaje amplificado que ingresara al respectivo pin del conversor análogo digital del subsistema central de adquisición. El voltaje amplificado queda de la forma:

$$V_{Amplificado} = V_{rect} * G_{COND} \quad (2.33)$$

Como se describió anteriormente el valor de conversor A/D es en base a la resolución de 10 bits que otorga el mismo, por lo que valor decimal resulta:

$$Valor_{ADC} = V_{Amplificado} / 0.00508[V] \quad (2.34)$$

Realizando las respectivas operaciones de despeja se llega que el valor de conductividad que se resalta en la **Ecuación 4.32**, donde la misma es ingresada al microcontrolador de subsistema de visualización y a la interfaz.

$$\text{Conductividad} = \frac{0.02 * G_{\text{COND}} * V_A}{\text{Valor}_{\text{ADC}} * 0.00508 * R_{V_6} * \pi} - \frac{0.02}{R_{V_6}} \quad (2.35)$$

2.4.4.3 Acondicionamiento del sensor para temperatura PT1000

El sensor SC4A posee adicionalmente un detector resistivo de temperatura de platino PT1000 que sirve tanto para la corrección de conductividad por el cambio de temperatura como medida adicional de la temperatura bajo el tanque del sistema solar termosifón. Para el acondicionamiento del PT1000 se utiliza un circuito medidor de incremento de resistencia.

El circuito se encarga de medir la diferencia de una resistencia entregada por el PT1000 con respecto a una de referencia, ya que la variación de esta resistencia se traduce en la variación de la temperatura a la cual está el dispositivo. Posteriormente se coloca un circuito amplificador para obtener la salida deseada en un rango de 0 a + 5.2 [V_{DC}]. La ganancia depende del valor de máximo de resistencia que se posea el sensor PT1000 que siendo para el caso del agua es de 100 [°C].

La **Ecuación 2.8** expresa el voltaje debido a la variación de temperatura del PT1000. (10)

$$V_o = -V_1 * \frac{\Delta R}{R_{\text{PT1000}} + R_{\text{Ref}}} \quad (2.36)$$

Dependiendo del valor de voltaje de salida que variará en un rango negativo pasa a un amplificador inversor que invierte el valor a un voltaje positivo y tiene también una ganancia específica para la condición máxima de temperatura.

El diagrama circuital implementado se visualiza en la **Figura 2.30**.

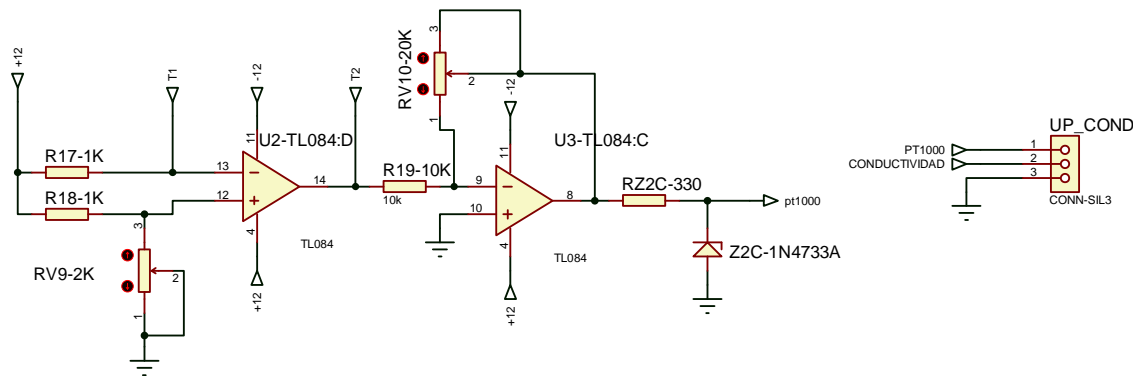


Figura 2.30 Diagrama circuital de acondicionamiento del sensor PT1000

En la **Figura 2.30** se muestra las dos etapas de acondicionamiento tanto la de medición de resistencia como la de amplificación que posteriormente entra al conversor análogo digital. La construcción de los circuitos de la **Figura 2.22**, **Figura 2.23**, **Figura 2.24**, **Figura 2.26**, **Figura 2.27**, **Figura 2.29** y **Figura 2.30** se encuentran en el mismo circuito impreso denominado “PCB Conductividad”.

2.4.4.3.1 Ecuación para el acondicionamiento del sensor para la temperatura PT1000

Para el transductor RTD⁴ del sensor de conductividad SC4A se tiene como acondicionamiento un circuito que debido al cambio de temperatura sensa el incremento de resistencia y entrega una señal de voltaje a su salida, para una temperatura de 0 [°C] corresponde una resistencia de 1000 [Ω] y para una temperatura de 100 [°C] corresponde una resistencia de 1385 [Ω]. Se parte de la siguiente relación de voltaje entregado por el circuito.

$$V_o = -V_1 \frac{\Delta R}{R_{PT1000} + R_{ref}} \quad (2.37)$$

Las resistencias R_{PT1000} y R_{ref} toman un valor de 1000 [Ω]. Con esta relación se obtiene el voltaje de salida V_o que se incrementa o disminuye en razón de la variación de la temperatura.

⁴ RTD: Resistance Temperature Detector (Detector de temperatura resistivo)

A su vez este voltaje es multiplicado por una ganancia para cubrir todo el rango disponible del conversor análogo digital del microcontrolador del subsistema central de adquisición, donde la ganancia se obtiene de la siguiente manera:

$$G_{PT1000} = \frac{5.2 [V_{DC}]}{2.31 [V_{DC}]} = 2.25 \quad (2.38)$$

El voltaje de referencia 5.2 [V_{DC}] se divide para el voltaje máximo entregado a la salida del circuito, siendo que para 100 [°C] se tiene un valor de voltaje de 2.31 [V_{DC}].

La relación del voltaje amplificado tiene la relación de:

$$V_{Amplificado} = -V_0 G_{PT1000} \quad (2.39)$$

Con el voltaje amplificado se tiene que el valor del conversor A/D se obtiene de la siguiente forma:

$$Valor_{ADC} = \frac{V_{Amplificado}}{0.00508} \quad (2.40)$$

Realizando el tratamiento de despeje de las ecuaciones anteriores, la variación de resistencia ΔR se consigue con la **Ecuación (4.10)**.

$$\Delta R = \frac{Valor_{ADC} * (R_{PT1000} + R_{ref}) * 0.00508}{G_{PT1000} * V_1} \quad (2.41)$$

A este valor se le debe sumar la resistencia base del RTD de 1000 [Ω] y reemplazar en la ecuación característica de temperatura vs resistencia para obtener la temperatura PT1000. Por lo que la temperatura queda dada por la siguiente ecuación:

$$PT1000 = 0.26(\Delta R + 1000) - 259.87 \quad (2.42)$$

2.4.5 SENSORES DE FLUJO

En el cálculo de la eficiencia tanto del sistema del colector térmico solar como de la placa colectora es necesario encontrar dos flujos másicos, por lo que se requieren dos sensores: el primero colocado a la entrada de suministro de agua y el segundo instalado a la salida de agua del colector. La nomenclatura para los flujos se encuentra en la **Tabla 2.19**.

Tabla 2.19 Nomenclatura de Flujos

Flujo	Nomenclatura
<i>Entrada de suministro de agua fría</i>	F ₁
<i>Salida de agua del colector</i>	F ₂

Como se mencionó anteriormente la necesidad de ubicar estos dos sensores en el sistema solar termosifón es para evaluar la eficiencia, ya sea para el sistema total o solo para el captador. En ambos casos se requiere un flujo másico cuyas unidades están en [kg/s].

El acondicionamiento de los sensores para los distintos flujos viene dado según el tipo del sensor, montaje y salida que se detalla en **Tabla 2.20**.

Tabla 2.20 Sensores de Flujo FP7001A y FP5600

Flujo	Tipo	Salida	Rango de Operación	Unidad
F₁(1pulg)	Sensor FP7001A	1 [Hz/fps]	0.1 a 6.2	[lt/s]
F₂(1pulg)	Sensor FP5600	15 [Hz/fps]	0.03 a 3.4	[lt/s]

Fuente: Tomado de las hojas técnicas (20) y (24)

Los rangos de operación de los diferentes sensores de flujo son adecuados en concordancia con el sistema de adquisición porque tanto el flujo de agua a la entrada del sistema del colector como para el flujo del agua a la salida de la placa colectora van a tener un flujo sobre los 0.1 litros y 0.03 litros sobre segundo respectivamente. Hay que mencionar que en la conversión de unidades de litros

por segundo a kilogramos por segundo se obtiene el mismo valor por que se asume que la densidad del agua que tiene un valor de 1 [kg/lt].

Realizando el diagrama de bloques general para la adquisición de las frecuencias dadas por los sensores a para un flujo dado se obtiene la **Figura 2.31** donde se muestra las partes del proceso de adquisición:

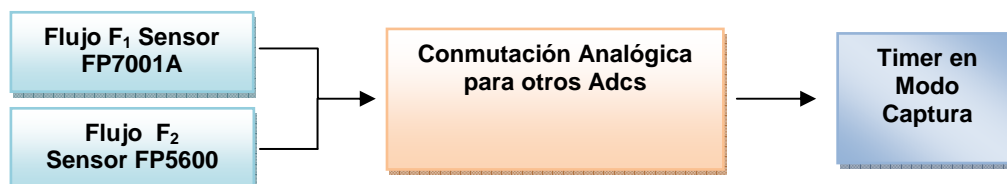


Figura 2.31 Diagrama de Bloques para adquisición de frecuencias de los sensores de flujo.

Para la conmutación analógica de las diferentes frecuencias de los sensores se utiliza el circuito integrado multiplexor análogo 4052 que es controlado digitalmente por tres entradas que son recibidas por el microcontrolador del subsistema de adquisición.

Realizado el diagrama de bloques se detalla las características de cada sensor para cada flujo.

2.4.5.1 Medición del Flujo F_1

El sensor de flujo FP7001A es un tipo de sensor de rueda de paletas que esta adicionalmente acoplado un sensor de temperatura. Este sensor se seleccionó porque en conjunto proporciona un seguimiento preciso de los típicos flujos de agua industrial, tanto soluciones acuosas corrosivas como fluidos de alta pureza. El sensor FP7001A utiliza una rueda de paletas, donde su movimiento se convierte en una salida de alto nivel de pulso de onda cuadrada por el sensor de efecto Hall de colector abierto. Las amplitudes del voltaje de pulso pueden ir de +5 a +18 [VDC] dependiendo de la alimentación de entrada (20).

Las especificaciones técnicas del sensor FP7001A se tienen en la **Tabla 2.21**.

Tabla 2.21 Especificaciones del Sensor de Flujo FP7001A

Parámetro	Valor	Unidad
Alimentación	5-18	[V _{DC}]
Precisión (De la escala completa)	+/- 2	[%]
Repetitibilidad (De la escala completa)	+/- 1	[%]
Frecuencia de Salida	1	[Hz/fps]
Viscosidad Máxima	5	[cps]
Rango de Medición	3-50	[GPM]

Fuente: Tomado de las hoja técnica (20)

Para la operación correcta del sensor, las presiones y temperaturas para el material con el que está elaborado el arreglo que contiene al sensor son:

- **PVC:** 150 [PSIG] @ 27[°C] (80[°F]), 100 [PSIG] @ 38[°C](100[°F]), 60 [PSIG] @ 49[°C] (120[°F]) 30 [PSIG] @ 60[°C](140[°F]).

Para el acondicionamiento de este sensor se sigue el siguiente diagrama circuital dado en la Figura 2.32, donde la señal de frecuencia que es proporcional al flujo y entra en el multiplexor 4052 para finalmente adquirirse en el timer modo captura del microcontrolador del subsistema de adquisición.

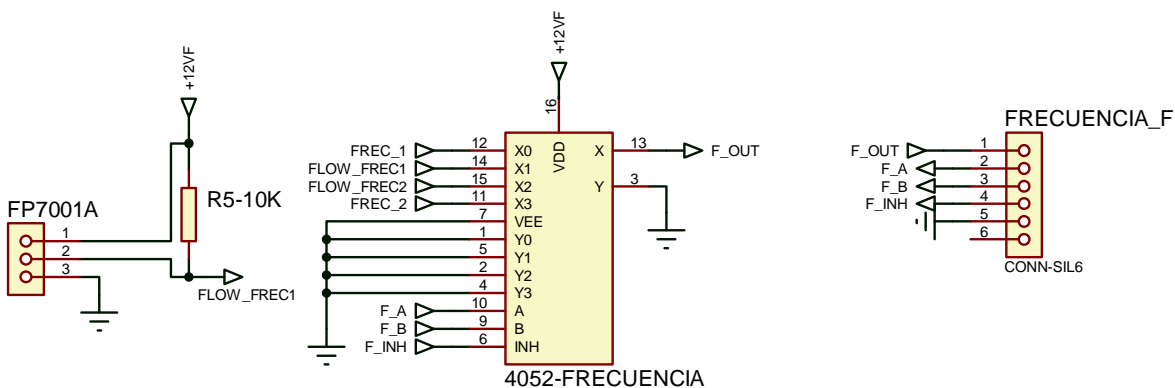


Figura 2.32 Diagrama circuital de acondicionamiento del sensor FP7001A

2.4.5.2 Medición del Flujo F₂

El sensor de flujo FP5600 es escogido por su alta resolución y bajo consumo, adecuado para la medición de flujo en sistemas de tuberías con velocidades muy bajas. Incorpora un diseño avanzado del sensor de efecto Hall, que le permite funcionar con una amplia gama de voltajes entregando una amplia medición de flujos. El sensor adicionalmente posee protección de polaridad inversa (21).

Las especificaciones técnicas del sensor FP7001A se tienen en la **Tabla 2.22**.

Tabla 2.22 Especificaciones del Sensor de Flujo FP5600

Parámetro	Valor	Unidad
Alimentación	3.3-24	[V _{DC}]
Linealidad(De escala completa)	+/- 1	[%]
Repetitividad(De escala completa)	+/- 0.5	[%]
Frecuencia de Salida	15	[Hz/fps]
Rango de Medición (1")	0.8-54	[GPM]

Fuente: Tomado de las hoja técnica (21)

El correcto funcionamiento del sensor depende del material donde este montado, en este caso para cobre cumple 200 [PSI] @ 20 [°C] (68 [°F]), 25 [PSI] @ 85 [°C] (185 [°F]). El acondicionamiento del sensor se rige a la **Figura 2.33**.

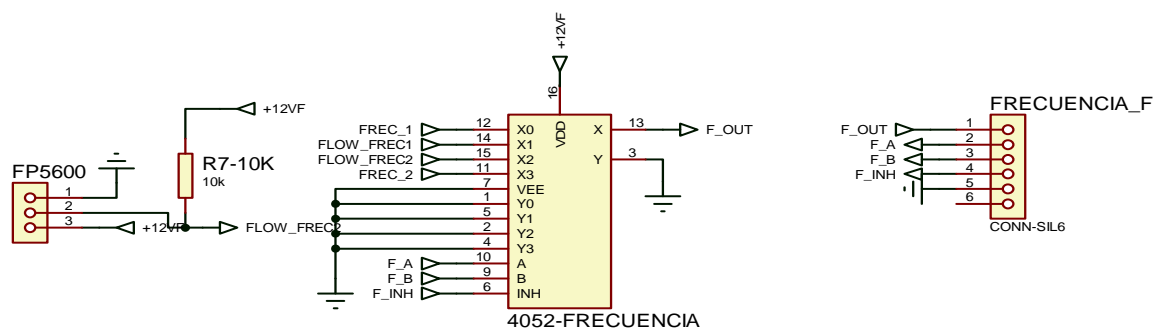


Figura 2.33 Diagrama circuital de acondicionamiento del sensor FP5600

Los circuitos de los sensores de Flujo FP7001A y FP5600 se encuentran ubicados en el circuito impreso bajo el nombre de “PCB-Frecuencias y varios ADCS”.

2.4.5.3 Ecuaciones de acondicionamiento de sensores para flujos F_1 y F_2

Las mediciones F_1 y F_2 depende de su correspondiente factor K, el cual es característico de la instalación y del flujo traducido a frecuencia por cada sensor.

Se necesita encontrar un factor K, ya que el mismo permite la relación entre el flujo (frecuencia del sensor) y el montaje del sensor. El flujo característico de una instalación depende de los dispositivos de plomería que estén dispuestos, por lo varia según la posición del sensor y el material de la tubería.

Las **Ecuaciones 2.43** y **2.44** muestran el cálculo del flujo realizado tanto por el HMI como por el microcontrolador del subsistema de visualización.

$$F_1 = K_{FP7001A} f_{FP7001A} = 0.048 f_{FP7001A} \quad (2.43)$$

$$F_2 = K_{FP5600} f_{FP5600} = 0.004 f_{FP5600} \quad (2.44)$$

2.5 SUBSISTEMA CENTRAL DE ADQUISICIÓN

Como se mencionó en los numerales anteriores, todos los subsistemas de acondicionamiento son controlados por el subsistema central de adquisición a través del microcontrolador y de sus componentes adicionales. También el subsistema cumple con el envío y recepción de datos a los subsistemas de transmisión y visualización.

Para un mejor entendimiento de las partes que componen este subsistema a continuación se tiene el diagrama de bloques en la **Figura 2.34**.

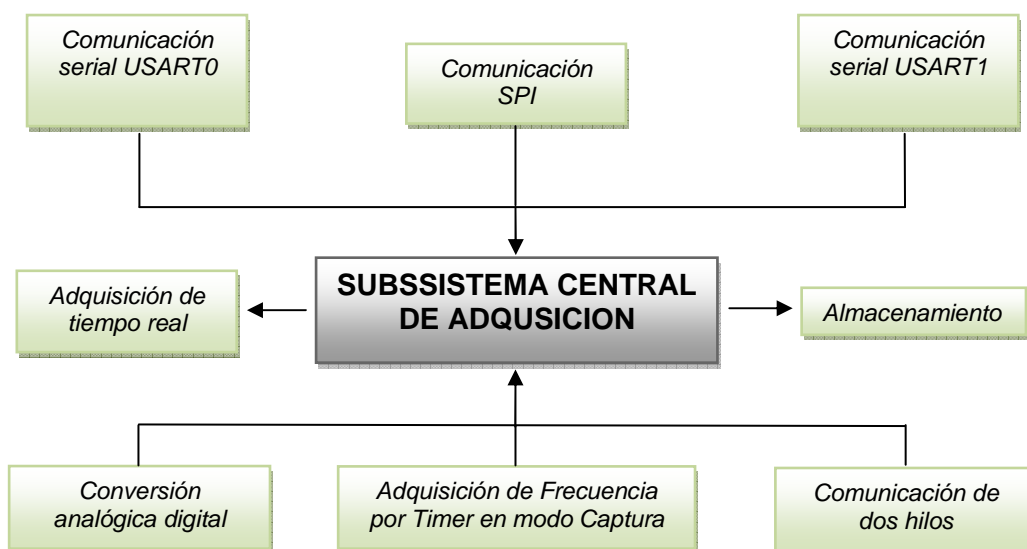


Figura 2.34 Diagrama de bloques del subsistema de adquisición

Detallando el diagrama de bloques se tienen los diferentes componentes constitutivos, los cuales cumplen con las siguientes funciones:

- El componente principal del subsistema de adquisición es el microcontrolador, el cual se encarga del manejo de todas las señales control y recepción de las respuestas dadas por los subsistemas de acondicionamiento, recepción y transmisión de datos por los puertos de comunicación serial y manejo del almacenamiento datos.

- El subsistema adquiere el tiempo real a través del reloj DS1307 para ordenar el envío de los datos cada cierto tiempo.
- El almacenamiento con el que cumple el subsistema, es de los datos en la noche ya que los mismos que son entregados por el microcontrolador y cuando se requieran son nuevamente recabados por la interfaz hombre-máquina del computador. La memoria que permite este proceso es la EEPROM 24LC1025.
- La conversión analógica digital del subsistema central de adquisición maneja las siguientes señales: la salida de temperatura T_1 del sensor de flujo FP7001A, las temperaturas desde T_2 a T_9 provenientes de las termocuplas, la radiación solar R_1 dada por el sensor de radiación 6450, conductividad y temperatura PT1000 dados por el sensor SC4A.
- El subsistema satisface la función de adquisición de las frecuencias para la variables F_1 , F_2 y H_1 obtenidas por los sensores de Flujo FP7001A, FP5600 y humedad HTF3223 respectivamente, a través del timer en modo captura del microcontrolador.
- Con la comunicación a dos hilos, el subsistema controla y recolecta los datos de temperatura ambiental T_A y humedad ambiental H_A otorgados por el sensor SHT15.
- La comunicación serial 232 USART0 y USART1 que posee el subsistema, administran tanto los datos de envío y recepción al subsistema de transmisión (Módulo Xbee 868) como el envío de datos al microcontrolador del subsistema de visualización respectivamente
- La comunicación SPI permite el paso del programa en *.hex cargado en el quemador al dispositivo conectado.
- Las conexiones extras están dispuestas adicionalmente para manejo de cualquier otro pin del microcontrolador del subsistema de adquisición.

A continuación se presenta el diagrama circuital del subsistema de adquisición en la **Figura 2.35**.

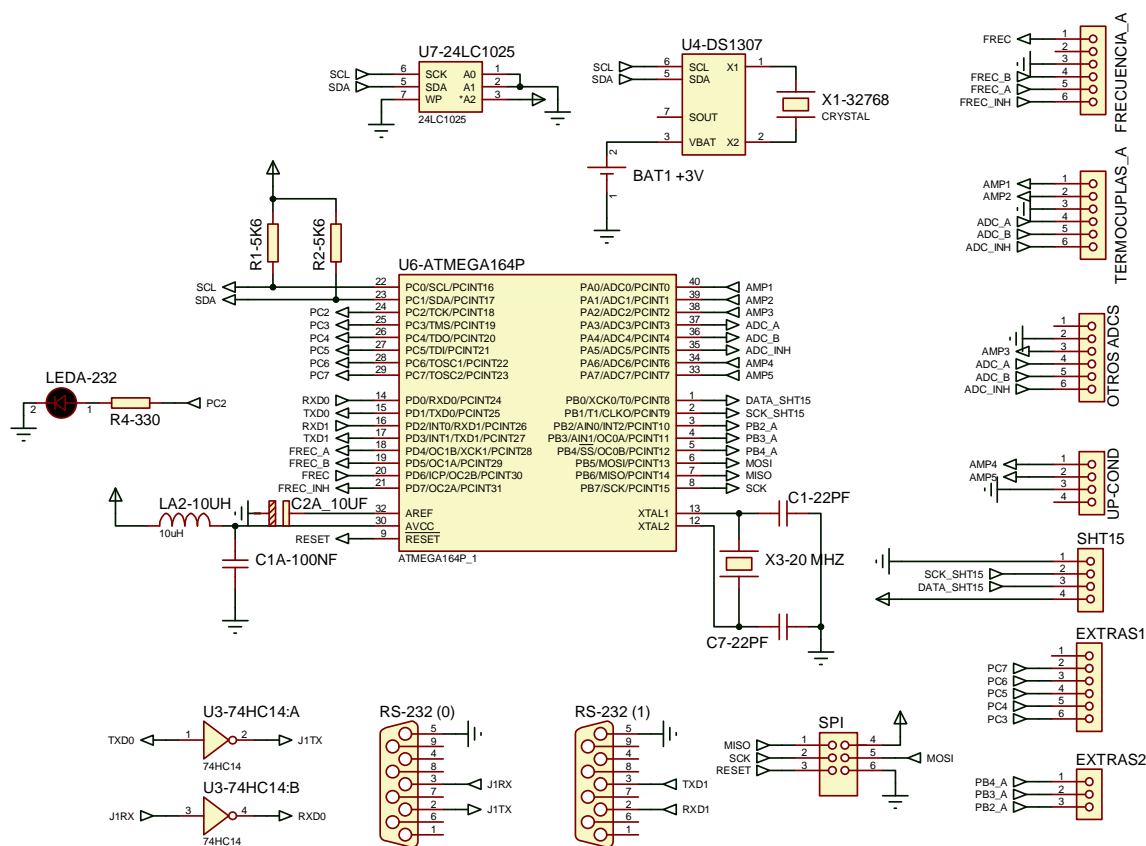


Figura 2.35 Diagrama circuital del subsistema de adquisición

2.5.1 MICROCONTROLADOR (31)

El microcontrolador del subsistema de adquisición es el que maneja tanto la transmisión de los datos al subsistema de transmisión y al subsistema de recepción y la recepción de las señales, con un orden determinado, de los subsistemas de adquisición. Este microcontrolador también se ocupa del manejo de la señal del reloj en tiempo real DS1307 y del almacenamiento de los datos en la noche en la memoria EEPROM 24LC1025.

El microcontrolador utilizado es el ATMEGA 164 PA que para los requerimientos de conversión analógica digital, timer en modo captura, comunicación RS-232 e I2C, interrupciones externas y manejo de diferentes de señales en sus puertos cumple completamente con estas exigencias.

El microcontrolador ATMEGA 164 PA posee algunas características y especificaciones técnicas que se denotan:

- *Arquitectura RISC*
 - 131 Instrucciones
 - 32 x 8 Registros de propósito de trabajo general
 - Sobre las 20 MIPS con cristal de 20MHz

- *Segmentos de memorias No volátiles*
 - 16 kbytes de memoria de programa Flash
 - 512 Bytes EEPROM
 - 1 kbytes de SRAM interna
 - 10,000 ciclos de escritura y borrado de memoria Flash

- *Periféricos*
 - Dos Timers/contadores de 8-bit con prescalers y modos de comparación
 - Un Timer/Contador de 16-bit con prescaler, modo de comparación/captura
 - Contador en tiempo real con Oscilador separado
 - 6 canales PWM (Modulación de ancho de pulso)
 - 8 canales de 10-bit (Conversor Análogo Digitales)
 - Orientación para interface serial de dos hilos
 - Dos módulos seriales programables USART
 - Interface serial SPI y Maestro/esclavo
 - Watchdog programable con oscilador externo
 - Fuentes externas e internas de interrupción

- Puertos de entrada y salida
 - 32 líneas de entrada y salida programables
 - 40 pines en el paquete PDIP

- Voltaje de Operación
 - 1.8 - 5.5V

- Grados de Velocidad
 - 0 - 4 MHz @ 1.8 - 5.5V
 - 0 - 10 MHz @ 2.7 - 5.5V
 - 0 - 20 MHz @ 4.5 - 5.5V

El microcontrolador ATMEGA 164PA se presenta en la **Figura 2.36** y Los recursos utilizados del microcontrolador se detallan en la **Tabla 2.23**.

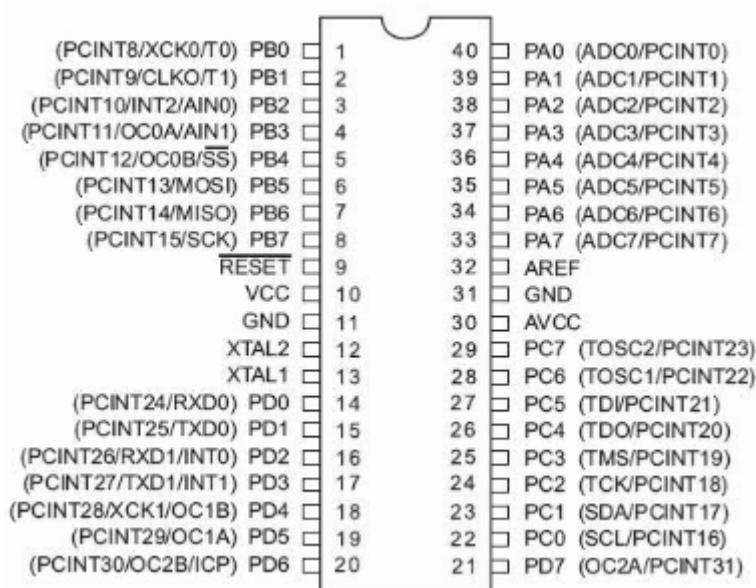


Figura 2.36 Microcontrolador ATMEGA 164PA (23)

Tabla 2.23 Recursos del Microcontrolador

Nombre	Pin	Designación	Función
PB0	1	Entrada/Salida	DATA_SHT15. Envío y recepción de datos de interfaz de comunicación TWI I (Sensor SHT15)
PB1	2	Salida	SCK_SHT15. Envío de señal de reloj de interfaz de comunicación TWI I (Sensor SHT15)
MOSI	6	-	Programación del microcontrolador a través de interfaz serial SPI
MISO	7	-	Programación del microcontrolador a través de interfaz serial SPI
SCK	8	-	Programación del microcontrolador a través de interfaz serial SPI
RXD0	14	Entrada	Recepción de datos al Puerto Serial USART0
TXD0	15	Salida	Transmisión de datos al Puerto Serial USART0
RXD1	16	Entrada	Recepción de datos al Puerto Serial USART1
TXD1	17	Salida	Transmisión de datos al Puerto Serial USART1
PD4	18	Salida	Control del bit LSB del multiplexor 4052 del subsistema de acondicionamiento de frecuencias
PD5	19	Salida	Control del bit MSB del multiplexor 4052 del subsistema de acondicionamiento de frecuencias
OC2A	20	Entrada	Entrada de timer1 en modo captura
PD7	21	Salida	Control del bit activación o desactivación del multiplexor 4052 del subsistema de acondicionamiento de frecuencias

SDA	22	Entrada/salida	Envío y recepción de datos de dispositivos con interfaz de comunicación serial I2C
SCL	23	Salida	Señal de reloj para dispositivos con interfaz de comunicación serial I2C
PC2	24	Salida	Habilitación del led cuando ingresa a interrupción serial USART0
ADC0	33	Entrada	Recepción de señal análoga proveniente del subsistema de acondicionamiento de Termocuplas 1
ADC1	34	Entrada	Recepción de señal análoga proveniente del subsistema de acondicionamiento de Termocuplas 2
ADC2	35	Entrada	Recepción de señal análoga proveniente del subsistema de acondicionamiento de Varios ADCS
PA3	36	Salida	Control del bit LSB del multiplexor 4052 del subsistema de acondicionamiento de Termocuplas y Varios ADCS
PA4	37	Salida	Control del bit MSB del multiplexor 4052 del subsistema de acondicionamiento de Termocuplas y Varios ADCS
PA5	38	Salida	Control del bit activación o desactivación del multiplexor 4052 del subsistema de acondicionamiento de Termocuplas y Varios ADCS
ADC6	39	Entrada	Recepción de señal análoga proveniente del subsistema de acondicionamiento de Conductividad (PT1000)
ADC7	40	Entrada	Recepción de señal análoga proveniente del subsistema de acondicionamiento de Conductividad(SC4A)

Para el manejo de los respectivos recursos del microcontrolador se requiere un programa de control, el cual se detalla en el siguiente capítulo de desarrollo de los programas de control.

2.5.2 RELOJ DS1307

El microcontrolador del subsistema central de adquisición de datos para transmitirlos cada minuto tanto al subsistema de transmisión como al subsistema de visualización requiere de una hora específica. La hora es entregada por el reloj serial en tiempo real DS1307 al microcontrolador cuando el mismo lo requiera.

El reloj DS1307 es un circuito integrado de bajo consumo, que codifica tanto la hora reloj como la fecha en decimal binario completo (BCD), posee una memoria no volátil SRAM de 56 bytes. La dirección y los datos se transfieren al microcontrolador a través de la comunicación I2C en los pines SDA y SCL del microcontrolador, proporcionando al mismo 2 grupos de 4 bits para cada variable que son segundos, minutos, horas, día, fecha, mes y año. El reloj funciona tanto en el formato de 24 horas o 12 horas con indicador AM/PM. El DS1307 ha incorporado un circuito de potencia que detecta fallas eléctricas y cambia automáticamente a la red de copia de seguridad, adicionalmente si el voltaje cae de lo permitido entra a funcionar la batería de 3 [V_{DC}].

El reloj DS1307 utiliza un oscilador externo de 32768 [Hz], que mediante un divisor de frecuencia, obtiene la cuenta en segundos (24).

El microcontrolador obtiene los datos del reloj DS1307 enviando la correspondiente dirección que se tiene en el mapa de memoria en la **Figura 2.37**.

ADDRESS	BIT 7	BIT 6	BIT 5	BIT 4	BIT 3	BIT 2	BIT 1	BIT 0	FUNCTION	RANGE
00h	CH	10 Seconds			Seconds			Seconds	00-59	
01h	0	10 Minutes			Minutes			Minutes	00-59	
02h	0	12	10 Hour	10 Hour	Hours			Hours	1-12 +AM/PM	
		24	PM/AM							
03h	0	0	0	0	0	DAY		Day	01-07	
04h	0	0	10 Date		Date			Date	01-31	
05h	0	0	0	10 Month	Month			Month	01-12	
06h	10 Year			Year			Year	00-99		
07h	OUT	0	0	SQWE	0	0	RS1	RS0	Control	—
08h-3Fh									RAM 56 x 8	00h-FFh

Figura 2.37 Mapa de Memoria del Reloj DS1307 (24)

Los pines correspondientes al reloj DS1307 se los muestra en la **Figura 2.38** mientras que el diagrama circuital de conexión se lo puede ver en la **Figura 2.35**.

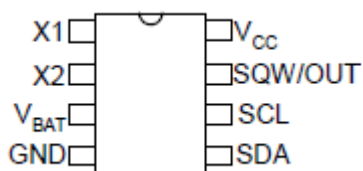


Figura 2.38 Diagrama de pines del Reloj DS1307 (24)

Para el presente proyecto no se utiliza el registro 07h de control de SQW/OUT.

2.5.3 MEMORIA 24LC1025

Para el almacenamiento de los datos son recolectados cada 5 minutos. Estos datos son enviados a la memoria EEPROM para su posterior lectura al día siguiente recabando todos los datos almacenados durante la noche.

La memoria 24LC1025 es una memoria de 128K x 8 (1024K bits) EEPROM (eléctricamente borrable PROM), capaz de funcionar a través de un amplio rango de voltaje (1.8 [V_{DC}] a 5.5 [V_{DC}]). Este dispositivo posee ambas formas de escritura tanto en bytes como la escritura de hasta 128 bytes de datos en página.

Este dispositivo es capaz de realizar lecturas aleatorias y lecturas secuenciales. La lectura puede ser secuencial dentro de los límites a la dirección 0000h a FFFFh y 10000h a 1FFFFh (25).

En la **Figura 2.39** se presenta tanto el diagrama de pines con su respectiva descripción.

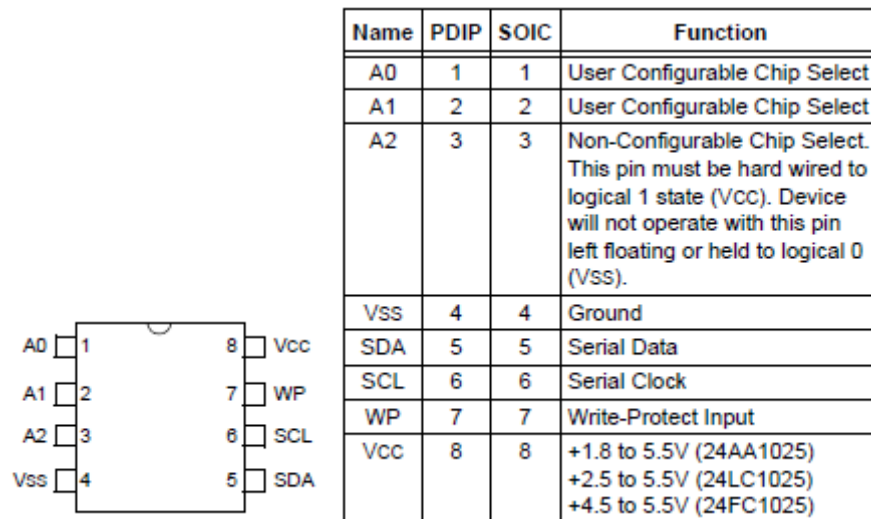


Figura 2.39 Diagrama y descripción de pines de la memoria 24LC1025 (25)

Los pines A0 y A1 son colocados a tierra y el pin A2 es colocado a Vcc como recomienda el fabricante. El diagrama circuital de la memoria se aprecia en la **Figura 2.35**.

2.6 SUBSISTEMA DE VISUALIZACIÓN

El subsistema de visualización cumple con las funciones de recopilación y presentación de los datos recibidos a través de la comunicación serial del subsistema de adquisición y los almacena como respaldo en una tarjeta de memoria extraíble. Los diferentes componentes que conforman este subsistema se muestra en la **Figura 2.40**.

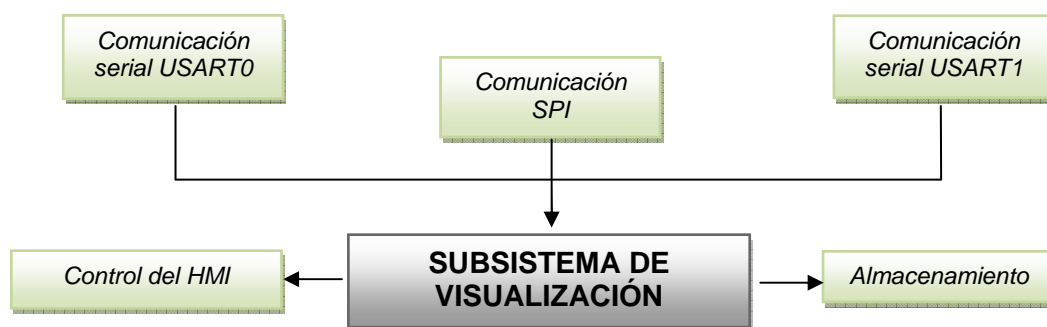


Figura 2.40 Diagrama de bloques del subsistema de visualización

Ampliando la información de cada parte del subsistema se tienen los siguientes desempeños:

- El subsistema de visualización a través del microcontrolador opera y controla las señales para la visualización y almacenamiento de los datos.
- El subsistema a través del módulo serial uMMC almacena los datos de recepción del microcontrolador bajo un formato de texto, para su posterior tratamiento en un computador.
- Con la comunicación serial 232 USART0 y USART1 se administran tanto la recepción de los datos provenientes del microcontrolador del subsistema de adquisición como el envío de los mismos al módulo serial uMMC respectivamente.
- La comunicación SPI permite el quemado del programa generado en el computador al microcontrolador.

- El subsistema de visualización cumple con el control de la interfaz local ya que a través de botones se manejan diferentes aplicaciones como son encendido y apagado del display LCD, cambio de la variable visualizada en el mismo y ejecución de comando de almacenamiento para la memoria SD como también el comando para extracción de la misma.

El diagrama circuital del subsistema de adquisición se presenta en la **Figura 2.41**.

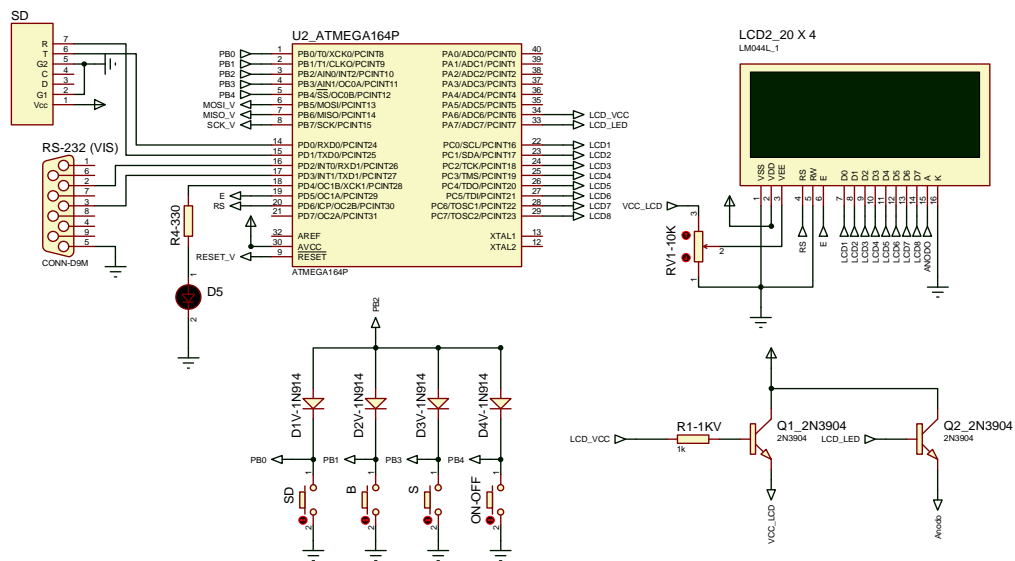


Figura 2.41 Diagrama circuital del subsistema de visualización

Resumiendo el diagrama circuital, la visualización de los datos se logra a través de un LCD, el mismo que es controlado por el microcontrolador ATMEGA 164PA. Se tiene varios botones para el control del encendido/apagado del LCD, cambio de la lectura de las diferentes variables físicas adquiridas. Se cuenta con un botón adicional para el manejo del módulo serial SD, el cual permite el ingreso o retiro de la tarjeta de memoria.

2.6.1 MICROCONTROLADOR

El microcontrolador del subsistema de visualización es el que se encarga tanto la recepción de los datos al subsistema de adquisición como del envío de los datos ya calculados por el mismo al módulo serial uMMC para el almacenamiento de los datos en la memoria extraíble. Este microcontrolador también se ocupa del manejo de las señales del LCD a través de los botones. Las características de

este microcontrolador ya se mencionaron en el numeral 4.5.1. Los recursos se presentan a continuación en la **Tabla 2.24**.

Tabla 2.24 Recursos del Microcontrolador del subsistema de Visualización

Nombre	Pin	Designación	Función
PB0	1	Entrada	Mando del botón para control del módulo serial SD
PB1	2	Entrada	Mando del botón para control de cambio ascendente de las variables adquiridas en el LCD.
INT2	3	Entrada	Interrupción generada por accionamiento de los 4 botones.
PB3	4	Entrada	Mando del botón para control de cambio descendente de las variables adquiridas en el LCD.
PB4	5	Entrada	Mando del botón para apagado y encendido del LCD.
MOSI	6	-	Programación del microcontrolador a través de interfaz serial SPI
MISO	7	-	Programación del microcontrolador a través de interfaz serial SPI
SCK	8	-	Programación del microcontrolador a través de interfaz serial SPI
RXDO	14	Entrada	Recepción de datos al Puerto Serial USART0
TXD0	15	Salida	Transmisión de datos al Puerto Serial USART0
RXD1	16	Entrada	Recepción de datos al Puerto Serial USART1
TXD1	17	Salida	Transmisión de datos al Puerto Serial USART1
PD4	18	Salida	Encendido/apagado de led indicativo de interrupción serial USART0
PD5	19	Salida	Control de la habilitación (Enable) del LCD
PD6		Salida	Control de instrucción o dato del LCD (RS)
PC0	22	Salida	Bit de dato D0 del LCD
PC1	23	Salida	Bit de dato D1 del LCD
PC2	24	Salida	Bit de dato D2 del LCD
PC3	25	Salida	Bit de dato D3 del LCD
PC4	26	Salida	Bit de dato D4 del LCD
PC5	27	Salida	Bit de dato D5 del LCD
PC8	28	Salida	Bit de dato D6 del LCD
PC7	29	Salida	Bit de dato D7 del LCD
PD6	33	Salida	Señal de control para encendido/apagado del LCD
PD7	34	Salida	Señal de control para encendido/apagado del led de fondo de LCD

El microcontrolador siendo la parte esencial del subsistema posee un programa de control el mismo será ampliado y profundizado en el siguiente capítulo de desarrollo de programas de control.

2.6.2 LCD

Para la visualización de los diferentes datos adquiridos por el subsistema de visualización se utiliza la pantalla de cristal líquido o LCD⁵ que es una pantalla delgada y plana formada por un número de píxeles en color o monocromos colocados delante de una fuente de luz.

⁵ Liquid Crystal Display

El LCD JHD204A viene en la configuración 20x4 que son 20 columnas por 4 filas, por lo que las principales características del mismo se adjuntan en la **Tabla 2.25**.

Tabla 2.25 Características del LCD JHD204A

Parámetro	Especificación
<i>Alimentación</i>	5 [V _{DC}] +/- 10%
<i>Contenido del display</i>	20 caracteres por 4 filas
<i>Puntos de Caracteres</i>	5 x 8
<i>Modo de manejo</i>	16 pines
<i>Tipo</i>	Verde reflectivo

Fuente: Tomado de hoja técnica (26)

La distribución de pines del mismo se encuentra en la **Figura 2.42**.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
VSS	VCC	VEE	RS	R/W	E	DB0	DB1	DB2	DB3	DB4	DB5	DB6	DB7	LED+	LED-

Figura 2.42 Distribución de pines del LCD JHD204A (26)

2.6.3 MÓDULO SERIAL uMMC

Para el almacenamiento de los datos de respaldo de todo el día del sistema de adquisición de datos se recurre a un módulo serial externo para la acumulación de los datos en una memoria extraíble en este caso una tarjeta de memoria SD. Estos datos tienen la opción de almacenarse en formato de texto cada vez y cuando el microcontrolador envíe una trama de comandos y datos.

El modulo serial uMMC es un circuito impreso que mediante un adaptador serial de almacenamiento de datos realiza la lectura y la escritura de datos en tarjetas Multimedia Card (MMC) o Secure Digital (SD) en formato FAT16 o FAT32.

El módulo puede crear archivos y almacenar datos en las tarjetas MMC/SD que copen la capacidad de almacenamiento de las mismas. Adicionalmente estas tarjetas pueden ser retiradas y leídas desde cualquier dispositivo estándar MMC o lector de tarjetas SD en un computador. Las características fundamentales de este módulo serial se encuentran en la **Tabla 2.26** (27).

Tabla 2.26 Características del Módulo Serial uMMC

Parámetro	Especificación
Tipo de tarjetas	SD/miniSD/microSD
Formato de tarjetas	MMC/SD/SDHC
Tamaño de tarjetas	8MB → 32GB
Sistema de archivos	FAT12, FAT16, FAT32
Interface de comunicación	Serial TTL de 8 bits, no paridad, 1 bit de parada
Velocidad Seriales	2400, 4800, 9600, 19200, 230400, 460800 [bps]
Temperatura de Operación	-40 [°C] a +85[°C]
Tamaño Físico	50.8x31.75 [mm]
Fuente de Alimentación	3-5 [V _{DC}]

Fuente: Tomado de hoja técnica (27)

Las conexiones eléctricas del módulo serial y la vista normal del módulo se encuentran en la **Figura 2.43**

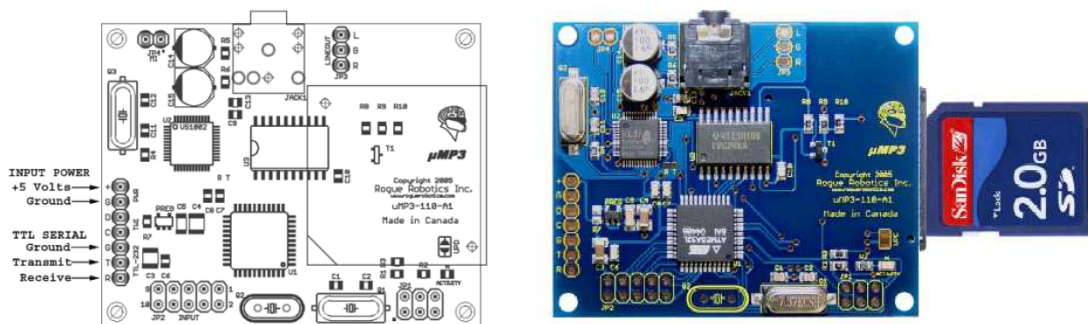


Figura 2.43 Conexiones eléctricas del Módulo Serial uMMC y Vista superior del Módulo Serial uMMC (27)

Cabe mencionar que los comandos enviados por el microcontrolador para el manejo adecuado de este módulo serial serán ampliados en el siguiente capítulo de desarrollo de los programas de control para el subsistema de visualización.

2.7 SUBSISTEMA DE TRANSMISIÓN

Para la transmisión de los diferentes datos proporcionados por el sistema de adquisición se requiere una comunicación inalámbrica entre el sistema remoto y el computador que recoge la información. Donde se van a desarrollar la pruebas de adquisición, transmisión y recepción de los datos existe una distancia considerable, esto es entre la terraza de la Facultad de Ingeniería Mecánica donde se encuentra ubicado el colector térmico solar con el sistema de adquisición de datos y el Laboratorio de Energías Alternativas en el segundo piso del Edificio del ICB donde se encuentra el computador.

Para este cometido se utiliza módulos de radio frecuencia de largo alcance. El módulo XBee-PRO 868 incorpora una conectividad inalámbrica de radio frecuencia que proporciona un alcance extendido a los dispositivos de punto final. Estos módulos utilizan una frecuencia de 868 [MHz] de protocolo punto a multipunto.

Posee una potencia radiada isotrópica equivalente de transmisión de 500 [mW] de y -112 [dBm] sensibilidad de recepción. Los módulos XBee-PRO 868 cubren distancias de línea de visión de hasta 40 [km], estos módulos son ideales para entornos donde la penetración de radio frecuencia y la distancia de transmisión son fundamentales dependiendo de la aplicación. Estos módulos son fáciles de usar, compartir un hardware común y son completamente interoperables con otros productos XBee (28).

Las características de los módulos XBee-PRO 868 se detallan en la **Tabla 2.27**.

Tabla 2.27 Características de los Módulos XBee-PRO 868

Rendimiento	
<i>Rango de datos RF</i>	24 [Kbps] (limitados por 10% ciclo en alto)
<i>Rango Puertas adentro/Urbano</i>	Sobre los 550 [m]
<i>Rango Puertas afuera/ Línea de vista</i>	Sobre los 40 [Km] con antena dipolo
<i>Potencia de Transmisión</i>	1 [mW] (0 [dBm]) a 315 [mW] (+25 [dBm])

<i>Sensibilidad de recepción (1% PER)</i>	-112 [dBm] o 500 [mW] EIRP
Características	
<i>Interface Serial</i>	3.3 [V] CMOS Serial UART
<i>Método de configuración</i>	Comandos API y AT
<i>Banda Frecuencia</i>	ISM 868 [MHz]
<i>Inmunidad a Interferencia</i>	Múltiples transmisiones, reconocimientos
<i>Rango de transmisión serial</i>	1.2 [Kbps] a 230.4 [Kbps]
Seguridad e interconexión	
<i>Encriptación</i>	128 [bit] AES
<i>Entrega de Paquetes confiables</i>	Rechazos/Reconocimientos
<i>Opciones de dirección</i>	Network ID, direcciones de 32 [bit]
<i>Canales</i>	Canal Simple
Requerimientos de Alimentación	
<i>Voltaje</i>	3.0 – 3.6 [V _{DC}]
<i>Corriente de Transmisión</i>	500 [mA] a 3.3V (800 [mA] max)
<i>Corriente de recepción</i>	65 [mA]

Fuente: Tomado de hoja técnica (28)

Estos módulos permiten su montaje en tarjetas de desarrollo USB y RS-232. El módulo montado en el tablero USB se conoce como la "BASE" y el módulo montado en el tablero de RS-232 se conoce como el "REMOTO". Por lo que se cumple con el esquema de la **Figura 2.45**.

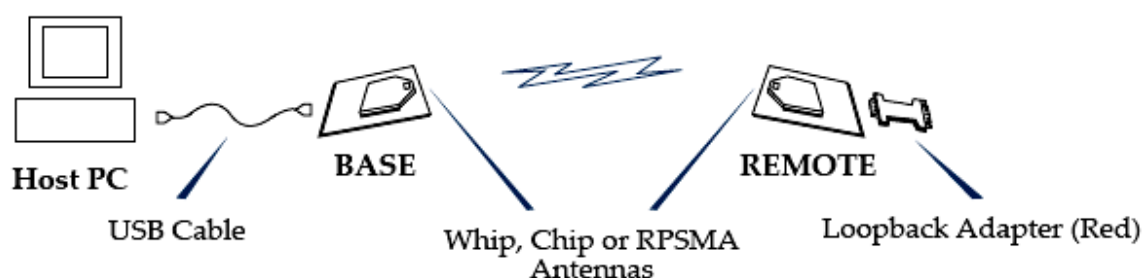


Figura 2.44 Montajes de los módulos Xbee en las tarjetas de desarrollo

En este capítulo se trató básicamente la estructuración de los diferentes elementos que componen al sistema y sus principales características, describiendo de manera funcional cada componente y su ubicación.

CAPÍTULO 3

DESARROLLO DEL PROGRAMA DE CONTROL

El microcontrolador ATMEGA164PA constituye la parte central del subsistema de adquisición como se muestra en la **Figura 2.35**, a continuación se detallará el programa de control implementado en el microcontrolador y en el interfaz hombre-máquina (HMI).

El programa de control del microcontrolador se desarrolló en “BASCOM-AVR” Versión 1.11.9.5, mientras que el HMI se realizó en “National Instruments LabVIEW Versión 2009”⁶.

3.1 PROGRAMA DE CONTROL

Como se mencionó anteriormente, el microcontrolador es el componente principal del subsistema de adquisición, que se encarga de:

- Manejar las señales control.
- Recepción de las respuestas dadas por los subsistemas de acondicionamiento.
- Recepción y transmisión de datos por los puertos de comunicación serial.
- Almacenamiento de datos.

Para realizar cada una de las tareas descritas, el programa de control consta de varias subrutinas.

Se considera para el presente proyecto como noche, el tiempo comprendido entre las 19:00:00 y las 07:00:00. El resto del tiempo se considera como día.

⁶ Licencia Institucional

A continuación se muestra la **Figura 3.1** que describe el funcionamiento del programa de control.

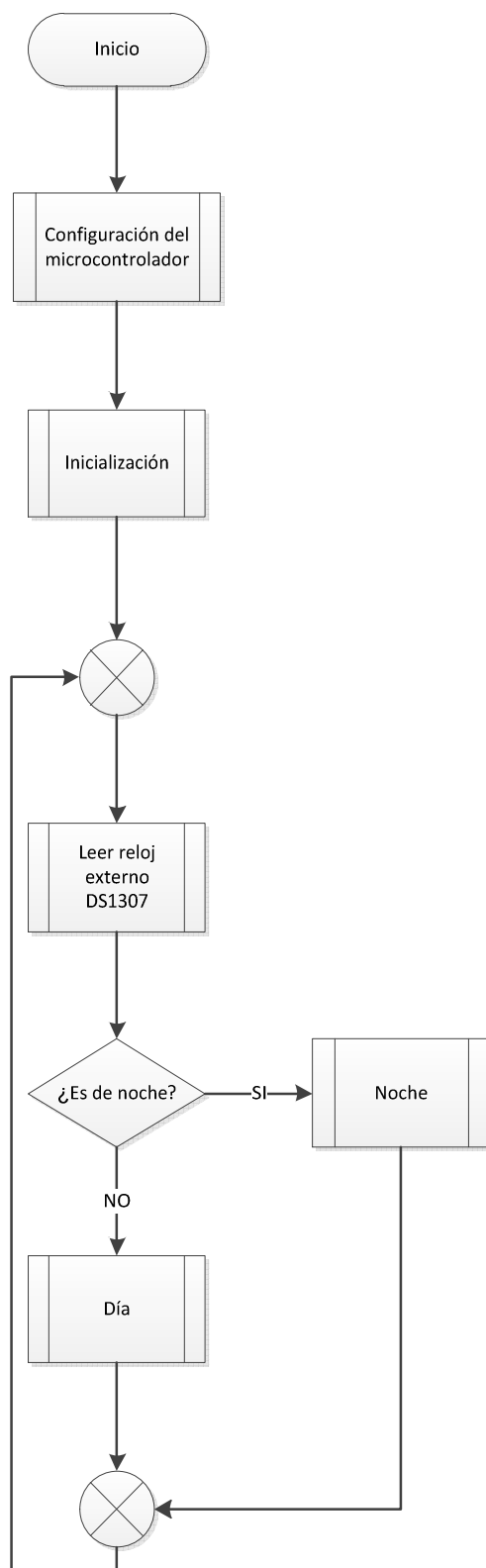


Figura 3.1 Diagrama de flujo del programa principal de control de microcontrolador del subsistema de adquisición

Detallando el diagrama de flujo en lenguaje estructurado se tiene que:

Configuración del Microcontrolador

Configuración de puertos de entrada y/o salida

Configuración de los puertos USART 0 (comunicación con subsistema de transmisión) y USART 1 (comunicación con subsistema de visualización) a una velocidad de 2400 bps

Configuración del Timer 1 en modo captura, habilitando noise canceler y edge falling.

Configuración del conversor análogo digital, modo single, prescaler de 128 y referencia AVCC

Configuración I2C (DS1307 y 24LC1025)

Configuración interrupciones

USART0_RX (Envío de dato del HMI)

TIMER1_CAPT (Medición de frecuencia)

Creación de variables a utilizar (Contadores, variables auxiliares y datos finales)

Fin de Tarea

Inicialización

Reset del sensor SHT15 (Secuencia de inicialización)

Deshabilitación de pines de control de multiplexores

Fin de Tarea

Leer reloj externo DS1307 (Librería "ds1307clock.lib")

Envío de bit de inicio

Envío de dirección 11010001

Recibo de hora (horas : minutos : segundos) y fecha (día/mes/año)

Recibo de acuse

Envío de bit de parada

Fin de Tarea

Día

Si segundos es igual a 0 entonces ir a subrutina envío de datos

Si segundos no es múltiplo de 4 retorno a Leer reloj externo DS1307.

Si segundos no es 56 entonces

Leer temperaturas y varios ADCs (T_2-T_9 , T_1 , R_1 Extra 1 y Extra 2)

Leer frecuencias (F_1 , F_2 y H_1)

Burbuja

Leer temperaturas y radiación (T_1-T_9 y R_1)

Leer frecuencias (F_1 , F_2 y H_1)

Burbuja

Leer conductividad (C y PT1000)

Leer ambiental (T_A y H_A)

Fin de Tarea

Enviar datos

Lectura de datos almacenados

Envío de datos al subsistema de transmisión a través del puerto USART0

Envío de datos al subsistema de transmisión a través del puerto USART1

Fin de Tarea

Noche

Si minutos no es múltiplo 5 retorno a Leer reloj externo DS1307

Leer temperaturas y varios ADCs (T_2-T_9 , T_1 , R_1 Extra 1 y Extra 2)

Leer frecuencias (F_1 , F_2 y H_1)

Burbuja

Leer conductividad (C y PT1000)

Leer ambiental (T_A y H_A)

Enviar datos

Grabar datos en la memoria 24LC1025

Fin de Tarea

3.1.1 SUBROUTINA LEER TEMPERATURA Y RADIACIÓN

La subrutina **Leer temperatura y radiación** se tiene en la **Figura 3.2**.

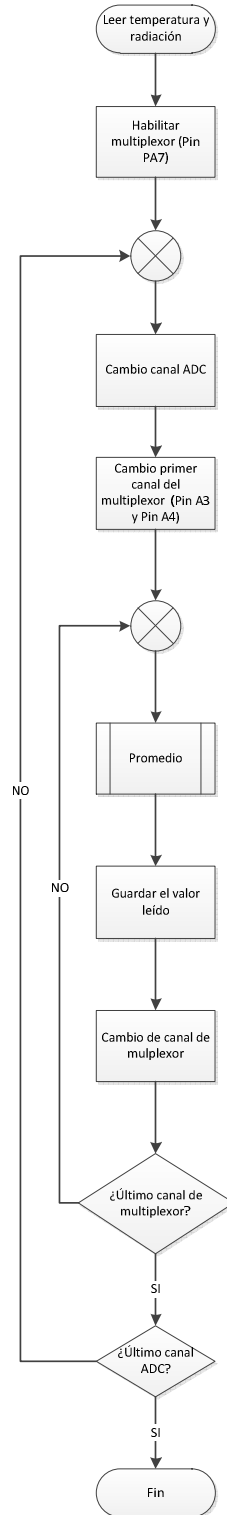


Figura 3.2 Diagrama de Flujo de la subrutina de Leer temperatura y radiación

Detallando en lenguaje estructurado de esta subrutina.

Habilitar multiplexor

Pin A5 para control del bit INH de los multiplexores ADG509 y CD4052

Fin de Tarea

Cambio canal del conversor análogo digital

Habilitación canal ADC0 (Para temperaturas $T_2 - T_5$)

Habilitación canal ADC1 (Para temperaturas $T_6 - T_9$)

Habilitación canal ADC2 (Para temperatura T_1 y Radiación R_1)

Fin de Tarea

Cambio canal del multiplexor

Pin A3 para control del bit LSB de los multiplexores ADG509 y CD4052

Pin A4 para control del bit MSB de los multiplexores ADG509 y CD4052

Fin de Tarea

Promedio

Lectura de canal ADC

Si el número de lecturas es menor de 5 entonces regrese a Promedio

Sacar valor medio de valores leídos

Fin de Tarea

3.1.2 SUBROUTINA LEER FRECUENCIA

La subrutina **Leer Frecuencia** se tiene en la **Figura 3.3**.

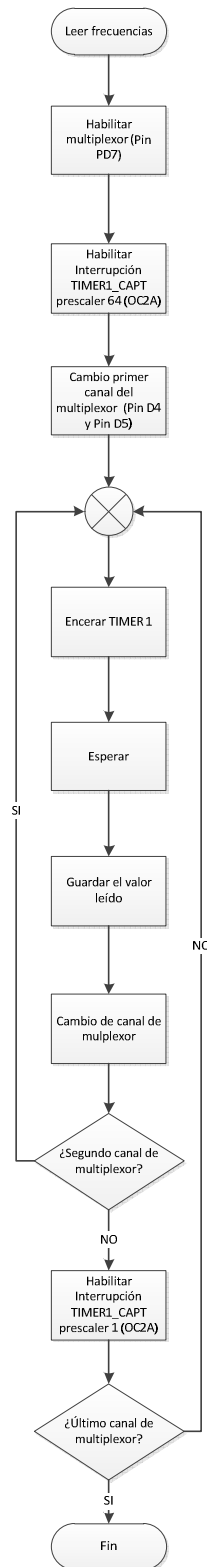


Figura 3.3 Diagrama de flujo de la subrutina de leer frecuencias

Habilitar multiplexor

Pin D7 para control del bit INH del multiplexor CD4052

Fin de Tarea

Interrupción TIMER1_CAPT

Si Prescaler = 1 para frecuencias 8 [kHz]-10 [kHz] (HTF3223) (H_1)

Si Prescaler = 64 para frecuencias 2 [Hz]- 600 [Hz] (SHT15) (F_1 y F_2)

Guardar Valor del Timer 1 es el valor del periodo medido

Encerar Timer 1

Iniciar Timer 1

Fin de Tarea

Cambio canal del multiplexor

Pin D4 para control del bit LSB del multiplexor CD4052

Pin D7 para control del bit MSB del multiplexor CD4052

Fin de Tarea

3.1.3 SUBROUTINA BURBUJA

La subrutina **Burbuja** se tiene en la **Figura 3.4**.

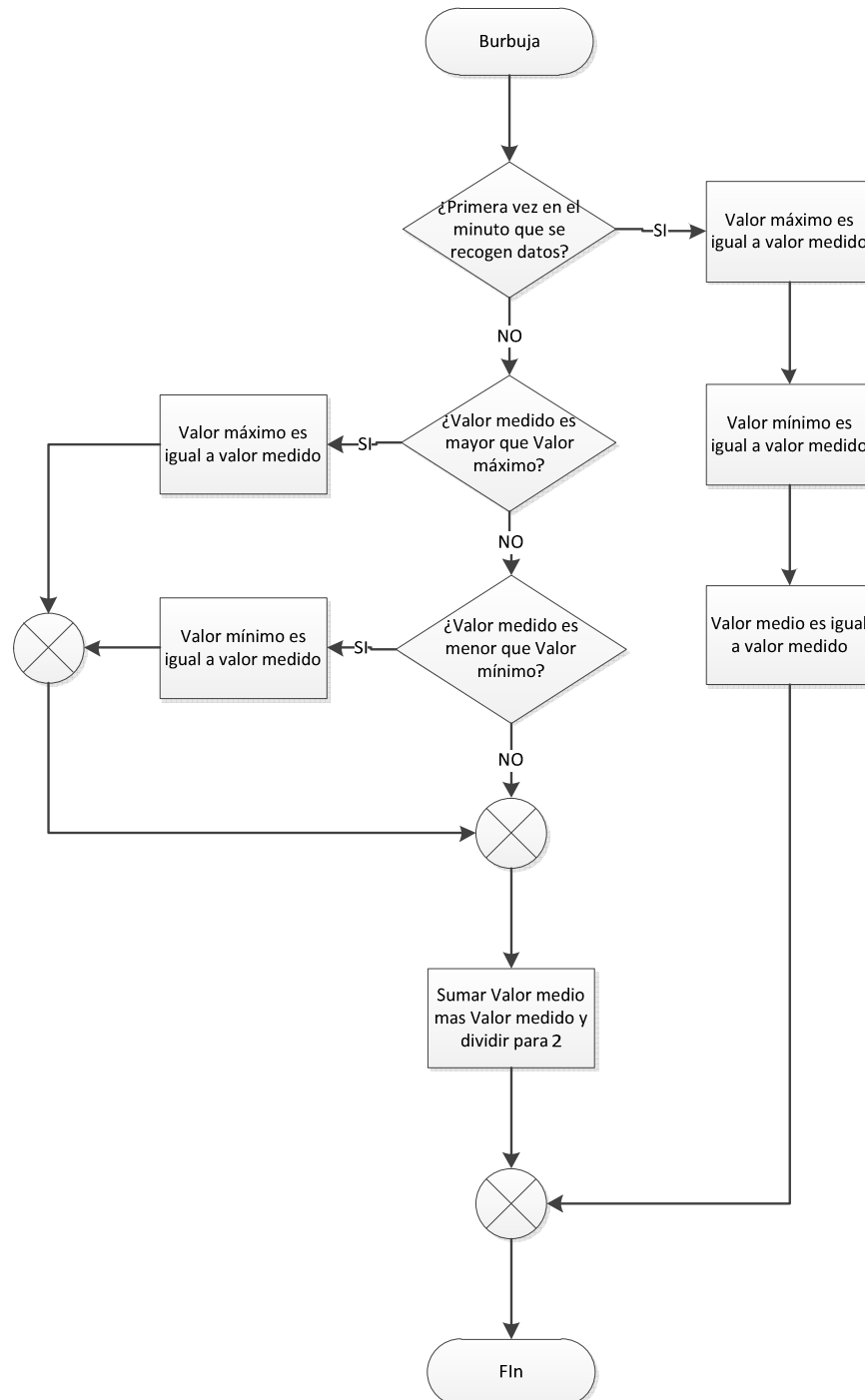


Figura 3.4 Diagrama de flujo de la subrutina de Burbuja

3.1.4 SUBROUTINA LEER CONDUCTIVIDAD

La **Figura 3.5** describe el funcionamiento de la subrutina.

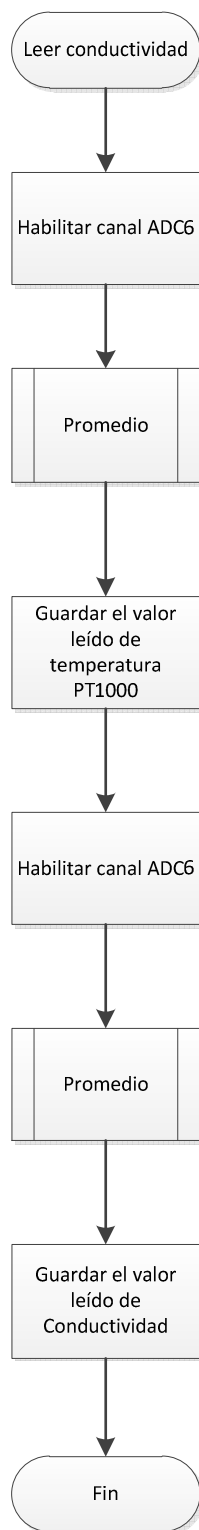


Figura 3.5 Diagrama de flujo de la subrutina de Leer conductividad

3.1.5 SUBROUTINA LEER AMBIENTAL

La **Figura 3.6** describe el funcionamiento de la subrutina.

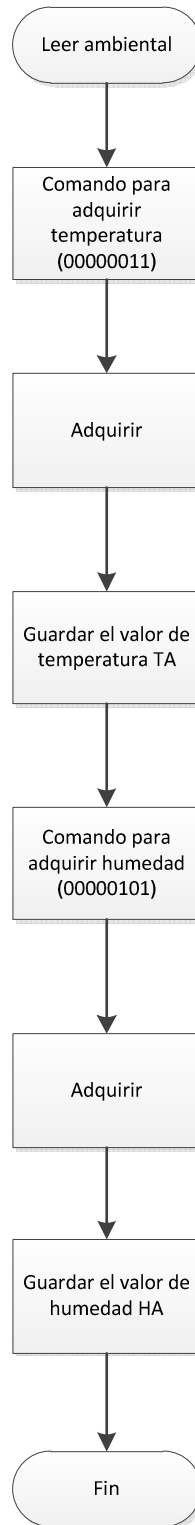


Figura 3.6 Diagrama de flujo de la subrutina Leer ambiental

Adquirir

Inicio de comunicación de dos hilos (pines PB0 y PB1)

Envío de comando de inicio (caso contrario sensor SHT15 permanece en Sleep Mode)

Espera de adquisición del sensor (80 [ms])

Recibo de dato medido por el sensor

Paro de comunicación y sensor retorno a sleep mode
Fin de Tarea

3.1.6 INTERRUPCION USART0_RX

A continuación la **Figura 3.7** detalla el funcionamiento de la subrutina.

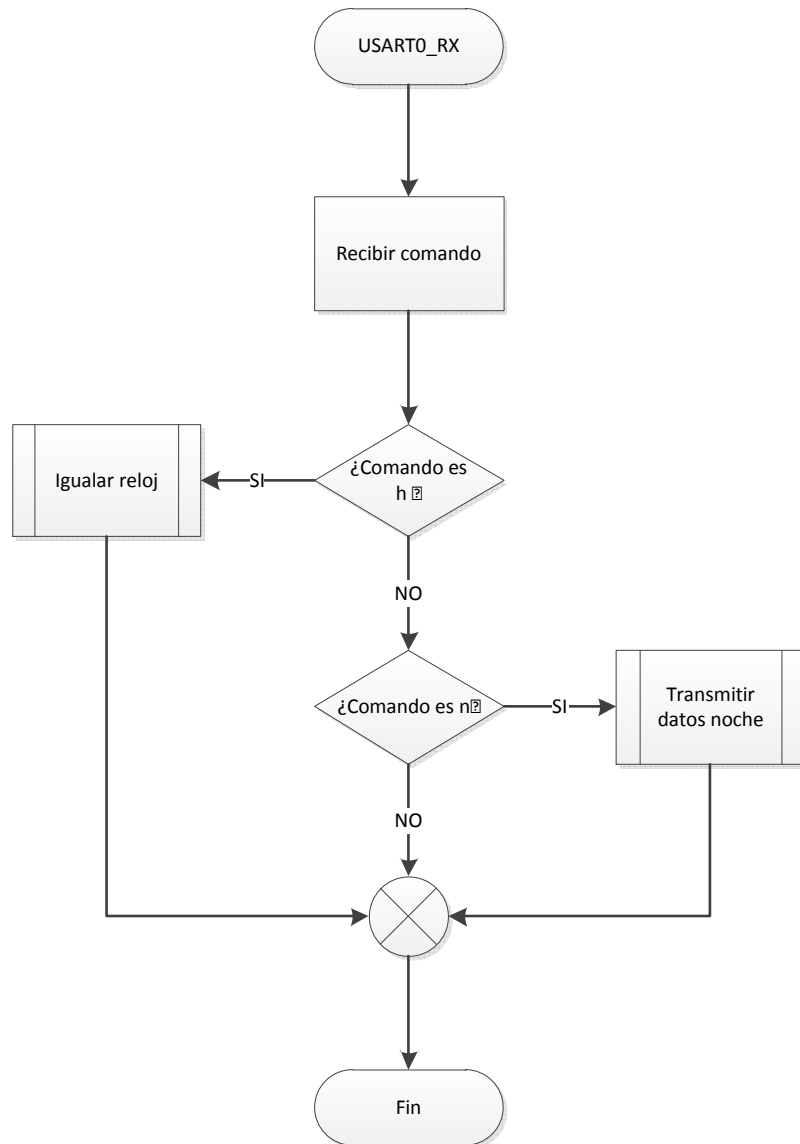


Figura 3.7 Diagrama de flujo de subrutina USART0_RX

Ampliando la descripción del diagrama de flujo se tiene el siguiente lenguaje estructurado:

Igualar reloj

Recibir la hora desde el HMI

Recibir la fecha desde el HMI

Llamar a librería "ds1307clock.lib" para corrección de fecha y hora del DS1307

Fin de Tarea

Transmitir datos noche*Envío de comando de lectura a la memoria 24LC1025**Si es último dato leído termina la tarea**Envío de dirección para envío de dato**Recepción del dato en tres bytes**Unión de los bytes para integrar un solo dato***Fin de Tarea****3.1.7 FORMATO DE ENVÍO DE DATOS**

En total se envían 48 datos, que se distribuyen según las variables medidas de la siguiente forma:

- 27 datos de temperatura (medio, máximo, mínimo).
- 3 datos de radiación (medio, máximo, mínimo).
- 12 datos de frecuencia (medio, máximo, mínimo).
- 2 datos extras de varios ADCs.
- 2 datos de temperatura y conductividad.
- 2 datos de factores ambientales.

Estos datos se envían individualmente, cada uno de ellos tiene un encabezado, que diferencia un dato de otro. Los encabezados se componen de una letra y un número. Los significados de las letras de los encabezados se detallan en la **Tabla 3.1**:

Tabla 3.1 Nomenclatura de variables

Variable	Nomenclatura
<i>Temperatura media</i>	t

<i>Temperatura máxima</i>	u
<i>Temperatura mínima</i>	v
<i>Frecuencia media</i>	f
<i>Frecuencia máxima</i>	g
<i>Frecuencia mínima</i>	h
<i>Varios ADCs</i>	w
<i>Conductividad</i>	c
<i>variables ambientales</i>	i

El número que sigue a la nomenclatura indica a que variable corresponde el dato. Por ejemplo si la temperatura mínima medida con la termocupla 5 (T6), se escribirá de la siguiente manera:

“v6dato”

En donde dato representa el valor mínimo medido de las 14 muestras tomadas durante un minuto. Los datos enviados al subsistema de transmisión se envían por el USART0 y los datos enviados al subsistema de visualización se envían por el USART1.

3.1.8 FORMATO DE ALMACENAMIENTO DE DATOS EN MEMORIA 24LC1025

Los datos se graban individualmente, cada uno ocupa tres localidades de memoria. Esto se debe a que en cada localidad de memoria se pueden almacenar datos tipo byte, en decimal quiere decir que va desde 0 a 255; los datos que se adquieren son tipo word, en decimal quiere decir que va desde 0 a 65535. Para que se puedan grabar los datos, cada uno de ellos se separa en 3 partes de la siguiente forma:

65535

Cada una de las partes se graba en una localidad de memoria, es por esto que cada dato almacenado ocupa tres localidades. Cada vez que se graba un dato se debe aumentar tres a la dirección de grabación.

A continuación la **Figura 3.8** detalla el funcionamiento de la subrutina.

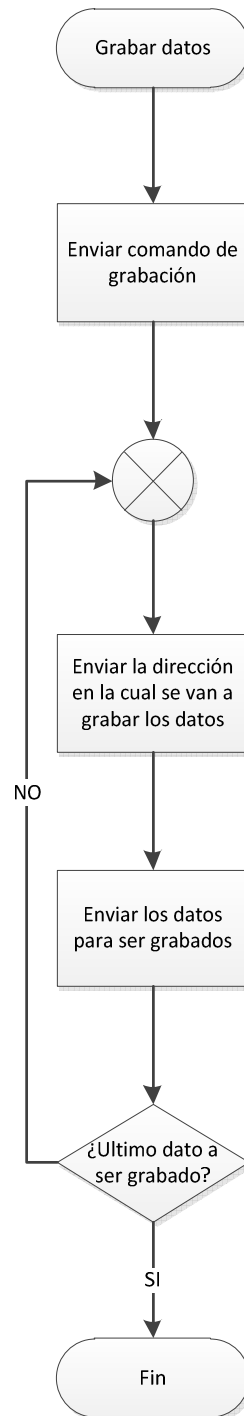


Figura 3.8 Diagrama de flujo de subrutina Grabar datos

3.2 PROGRAMA DE CONTROL DEL SUBSISTEMA DE VISUALIZACIÓN

El microcontrolador del subsistema de visualización es el componente principal y se encarga de:

- Recepción de los datos enviados por el subsistema de adquisición.
- Calculo de los valores de las variables medidas
- Envío de los datos calculados al módulo serial uMMC para el almacenamiento de los datos en la memoria extraíble.
- Manejar el LCD, dispositivo que muestra los valores medidos.
- Manejar los botones que permiten realizar distintas funciones.

La **Figura 3.9** muestra el funcionamiento del programa de control.

En lenguaje estructurado de la **Figura 3.9** se tiene que:

Configuración del Microcontrolador

Configuración de puertos de entrada y/o salida

Configuración de los puertos USART 0 (comunicación con Modulo Serial uMMC) y USART 1 (comunicación con subsistema de adquisición) a una velocidad de 2400 bps

Configuración interrupciones

USART0_RX (Envío de dato del subsistema de adquisición)

INT2 (Bajo la pulsación de los botones)

Creación de variables a utilizar (Contadores, variables auxiliares y datos finales)

Fin de Tarea

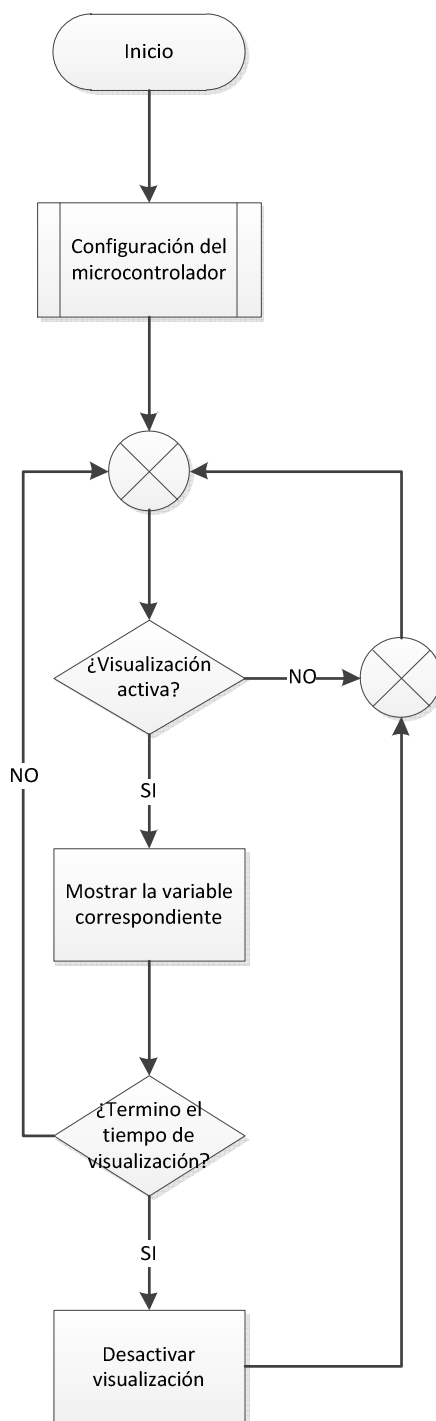


Figura 3.9 Diagrama de flujo del programa de control del microcontrolador del subsistema de visualización

3.2.1 INTERRUPCIONES

3.2.1.1 USART1_RX

A continuación se muestra la **Figura 3.10** que describe su funcionamiento

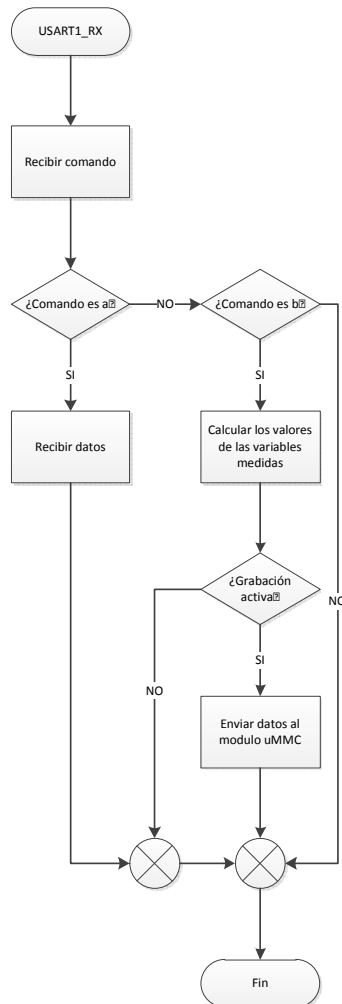


Figura 3.10 Diagrama de flujo de subrutina USART1_RX

Para indicar el inicio de la transmisión de datos el Subsistema de adquisición envía el comando “a” seguido por los datos, así mismo para indicar la finalización de la transmisión se envía el comando “b”. Como se indicó antes, cada uno de los datos tiene un encabezado, que diferencia un dato de otro.

El cálculo de las variables medidas se realiza mediante las ecuaciones para el acondicionamiento de los diferentes sensores que se detallaron en el capítulo anterior.

3.2.1.2 INT2

A continuación se muestra la **Figura 3.11** que describe el funcionamiento de la interrupción.

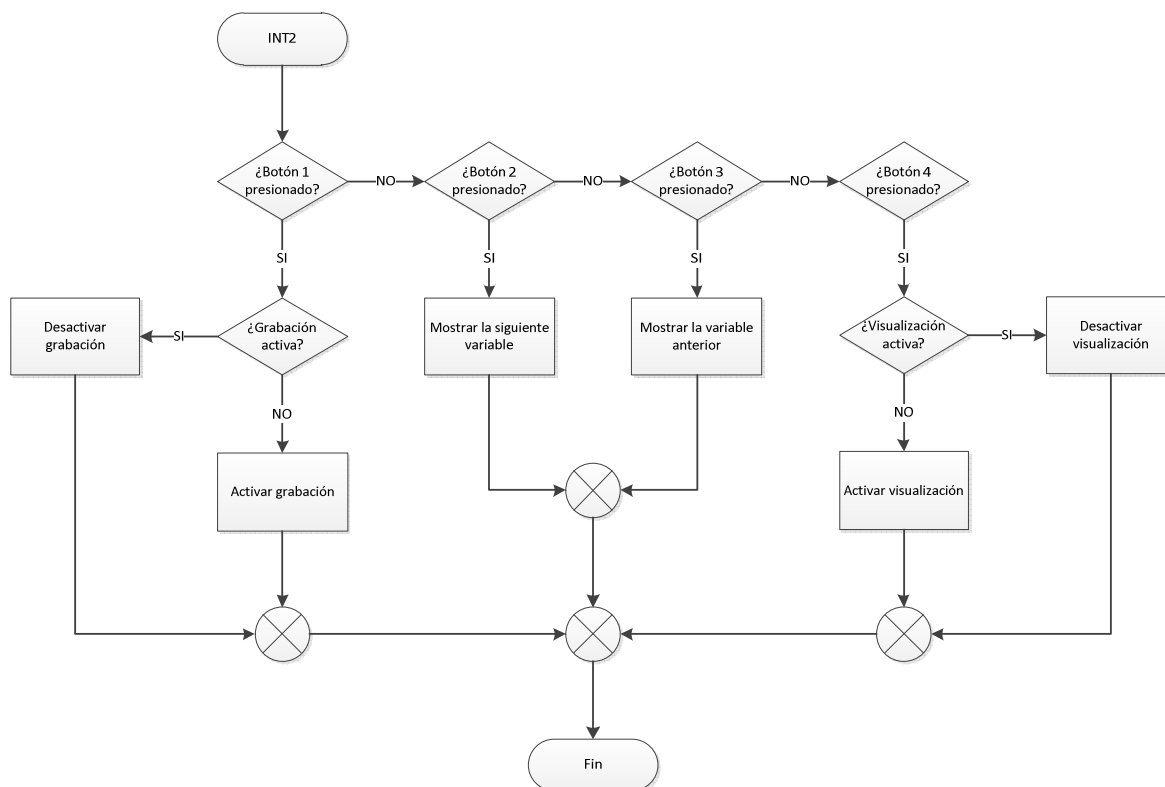


Figura 3.11 Diagrama de flujo de la subrutina INT2

El módulo uMMC necesita que se le ordene cuando empezar una grabación y en especial cuando termina la misma, ya que para expulsar la memoria SD se requiere terminar la sesión de trabajo para tener una grabación exitosa de datos.

Para activar la visualización, el sistema conecta la alimentación de 5.2 [V] al LCD por medio de un transistor.

3.3 INTERFAZ HOMBRE-MÁQUINA (HMI)⁷

La interfaz hombre-máquina (HMI) es un software cuyas funciones son las siguientes:

- Ingreso al software solo de usuarios registrados.
- Mostrar los datos enviados por el sistema de adquisición de datos remoto.
- Guardar los datos recibidos en un archivo de texto.
- Generar reportes en Excel con los datos almacenados en los archivos de texto creados con anterioridad.
- Igualar el reloj interno del sistema de adquisición de datos remoto DS1307.
- Descargar los datos almacenados la noche anterior.
- Comprobar la conexión con el sistema de adquisición de datos remoto.

Ya que la Escuela Politécnica Nacional tiene la licencia del software de National Instruments “LabVIEW”, se decidió utilizar este programa para el desarrollo del interfaz hombre-máquina.

3.3.1 LABVIEW

LabVIEW es un entorno de programación gráfica usado por miles de ingenieros e investigadores para desarrollar sistemas sofisticados de medida, pruebas y control usando íconos gráficos e intuitivos y cables que parecen un diagrama de flujo.

Ofrece una integración incomparable con miles de dispositivos de hardware y brinda cientos de bibliotecas integradas para análisis avanzado y visualización de datos, todo para crear instrumentación virtual.

⁷ HMI (Human Machine Interface)

3.3.2 DESARROLLO DEL HMI

La interfaz hombre-máquina (HMI) se comunica con el sistema de adquisición de datos remoto por medio de la placa receptora que es parte del subsistema de envío de datos. Esta placa se conecta al computador por medio de un puerto USB. La comunicación se realiza utilizando el protocolo RS232.

3.3.2.1 Ingresar usuario y contraseña

Esta ventana aparece cuando ejecutamos el programa. La **Figura 3.12** muestra la ventana para el ingreso del usuario y contraseña.

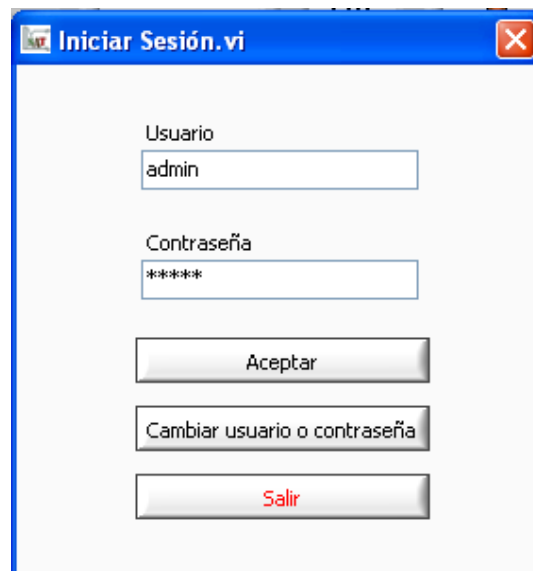


Figura 3.12 Ventana de ingreso del usuario y contraseña

Si es la primera vez que se ingresa al software, el nombre de usuario y contraseña por defecto son:

- Usuario: admin
- Contraseña: 12345

Para cambiar estos parámetros presionamos el botón “Modificar usuario”, a continuación la **Figura 3.13** muestra la ventana que aparece.



Administrador usuarios 6.2.vi

Sesión iniciada 

Usuario

Contraseña

Aceptar

Salir

Figura 3.13 Ventana de Modificar usuario

Aquí primero se debe ingresar el usuario y la contraseña actual, para poder modificar estos dos parámetros, tal como indica la **Figura 3.14**.



Administrador usuarios 6.2.vi

Sesión iniciada 

Usuario
admin

Contraseña

Nuevo usuario

Nueva contraseña

Confirmar contraseña

Aceptar

Cambiar

Salir

Figura 3.14 Ventana de modificación de usuario con sesión iniciada

3.3.2.2 Configurar comunicaciones

La **Figura 3.15** muestra la ventana para la configuración de comunicaciones.

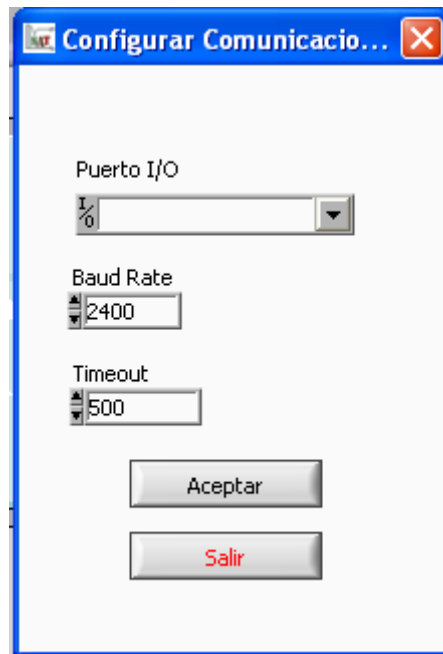


Figura 3.15 Ventana de configuración de comunicaciones

En la casilla "Puerto I/O" se selecciona el puerto de comunicaciones al cual se conectó el receptor inalámbrico. La velocidad de comunicación y el timeout por defecto son de 2400 baudios y 500 ms respectivamente.

En caso de no seleccionar ningún puerto de comunicaciones el programa emite un mensaje de error. Si se selecciona el puerto equivocado, la transmisión y recepción de datos es nula, por lo que se tendrá que salir y volver a ejecutar el programa.

3.3.2.3 Pantalla principal

La pantalla principal muestra los datos enviados por el Subsistema de adquisición. Observamos una representación del sistema que se monitorea, con las medidas realizadas en los distintos puntos del sistema.

La **Figura 3.16** muestra la ventana principal.

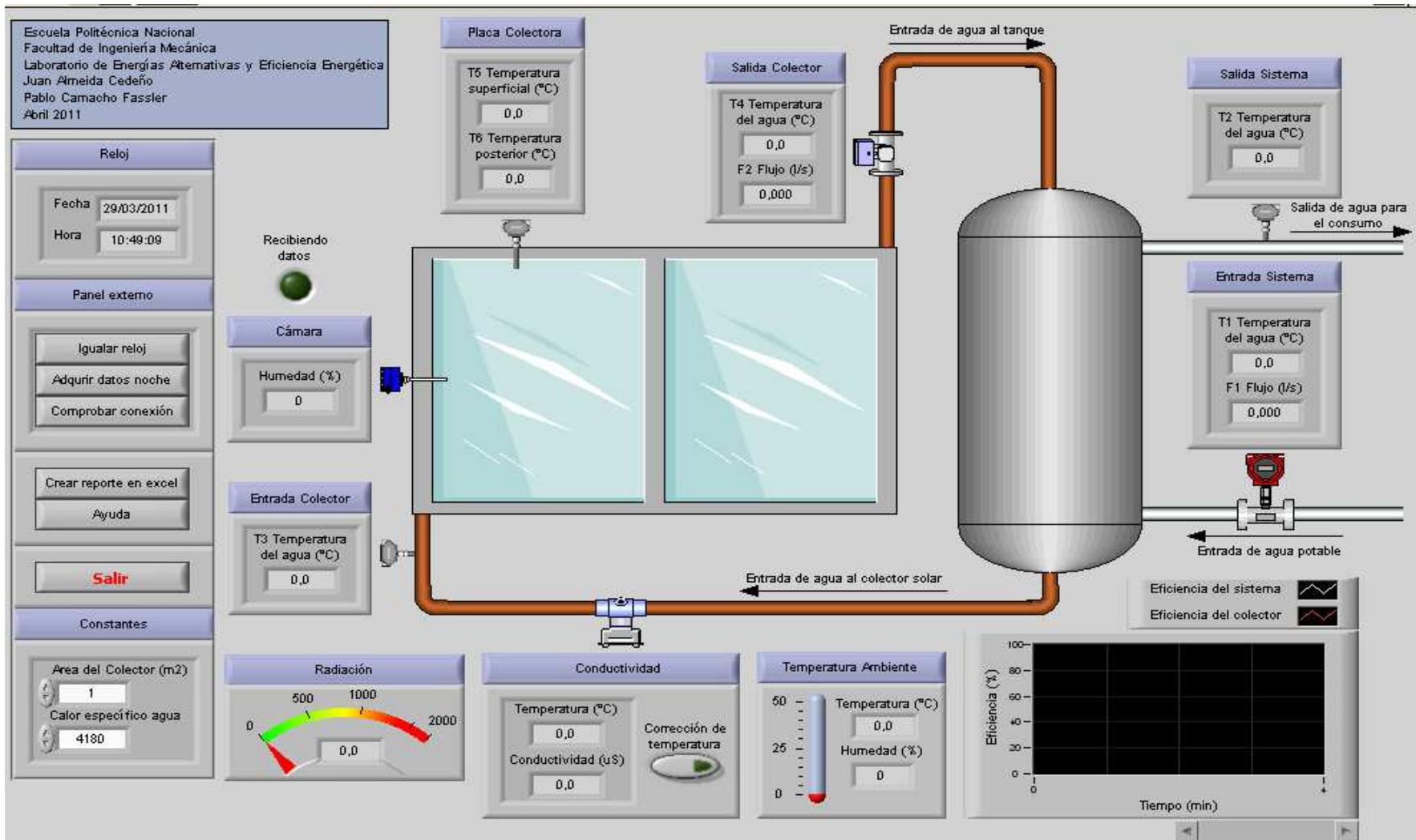


Figura 3.16 Ventana Principal del HMI

Los datos adquiridos se almacenan automáticamente en un archivo *.txt cuyo nombre viene dado por la fecha en la cual se recolectaron esos datos. Este archivo se almacena en el directorio por defecto:

C:\Recoleccion de datos\Día\"fecha\".txt

3.3.2.3.1 Igualar reloj

Este botón permite igualar el reloj del Subsistema de adquisición con la hora y fecha del computador que aloja la HMI, con la finalidad de que los dos sistemas estén sincronizados.

3.3.2.3.2 Adquirir datos noche

Con este botón se puede ordenar la adquisición de datos almacenados la memoria del Subsistema de adquisición, que fueron adquiridos la noche anterior. La **Figura 3.17** muestra la ventana que aparece cuando se presiona el botón “Adquirir datos noche”



Figura 3.17 Ventana de adquirir datos noche

Los datos obtenidos se almacenan en un archivo de texto que se recoge en el directorio “C:\Recolección de datos\Noche\"fecha\".txt. El nombre del archivo de texto se genera automáticamente y es la fecha de recolección.

Existen dos formas para que la ventana se cierre, la primera es presionando el botón “Salir”, con lo que se finaliza de manera abrupta la adquisición; y la segunda es cuando se recibe el último dato desde el Subsistema de adquisición.

3.3.2.3.3 *Comprobar conexión*

Este botón permite verificar si la HMI se encuentra conectada con el Subsistema de adquisición.

3.3.2.3.4 *Crear reporte en Excel*

La **Figura 3.18** muestra la ventana que aparece cuando se presiona el botón “Crear reporte en Excel”.

Microsoft Excel es un poderoso paquete de software. Para crear reportes. LabVIEW ofrece un conjunto de funciones flexibles y fáciles de usar para controlar este paquete de software.

Usando la subrutina para la creación de reportes en Excel, los datos almacenados en un archivo *.txt previamente por el interfaz hombre-máquina (HMI), se presentan de manera ordenada, en distintas tablas y gráficos, de acuerdo a la magnitud medida. Las tablas y gráficos realizados en el reporte permiten un tener los datos listos para posteriormente realizar los estudios cuya finalidad es determinar la eficiencia de los colectores solares térmicos.

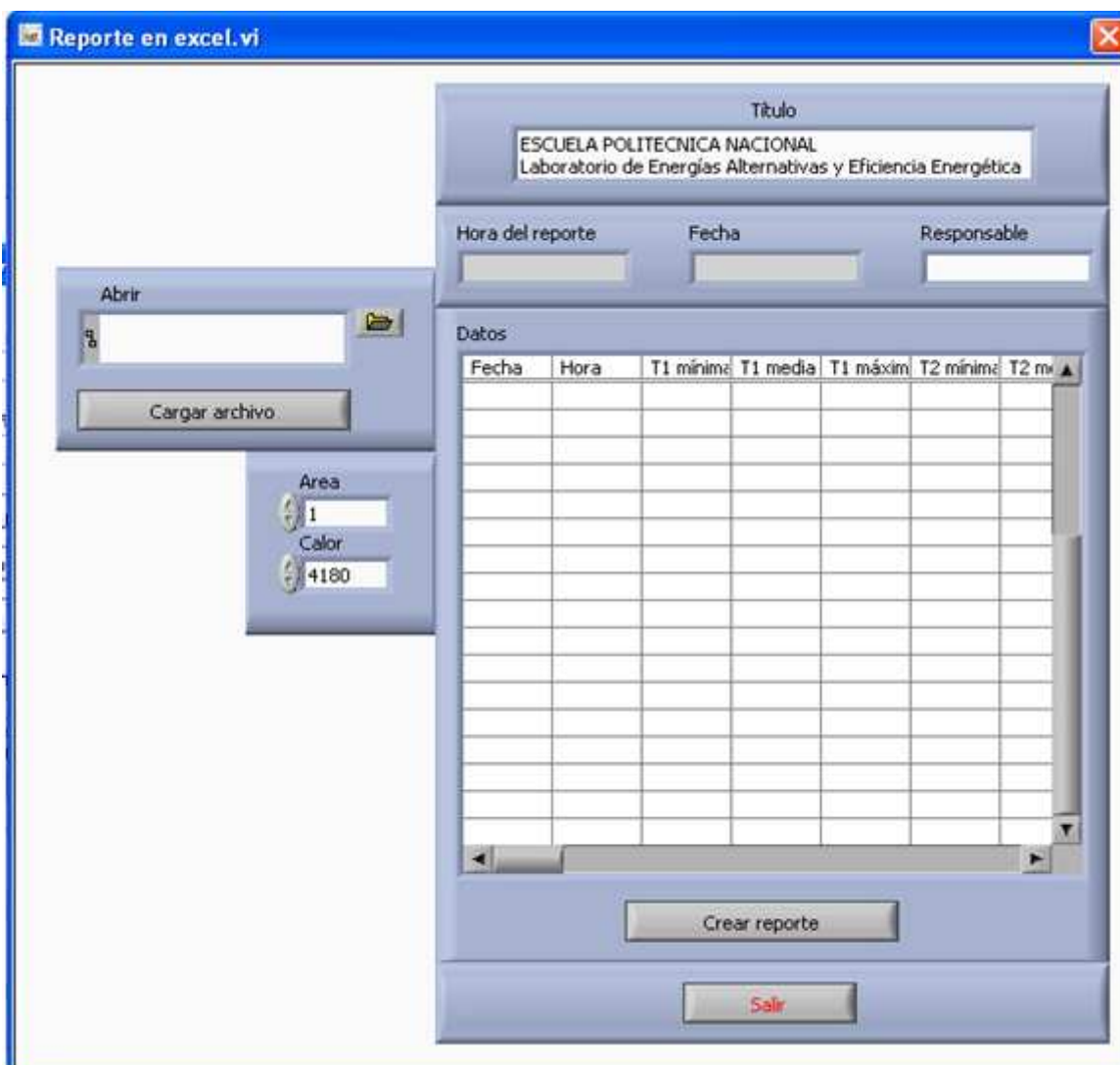


Figura 3.18 Ventana de crear reporte en Excel

Se pueden cargar los archivos que contienen datos almacenados tanto en el día, como en la noche. El programa direcciona automáticamente a la carpeta “Recolección de datos”, en la cual se encuentran los archivos *.txt. También se pueden cargar los datos almacenados en la memoria SD almacenados por el sistema de adquisición de datos remoto.

En este capítulo se trató de los programas de control para los microcontroladores de los subsistemas y del HMI.

CAPÍTULO 4

PRUEBAS Y RESULTADOS

Para la respectiva verificación y cumplimiento de los objetivos planteados como también para la delimitación del comportamiento del sistema de adquisición de datos se realizaron diferentes pruebas para las diferentes variables a ser adquiridas.

Las pruebas realizadas buscaban determinar las características del sistema son aspectos como estabilidad, precisión y limitación en comparación a sensores y medidores comerciales usados como referencias.

4.1 PRUEBAS DE SENSORES DE TEMPERATURA

En las pruebas de medición de temperatura para los diferentes puntos del colector térmico solar, al contar con distintos métodos de acondicionamiento y diferentes características de los transductores, se decidió diseñar pruebas específicas para cada uno de ellos.

4.1.1 PRUEBAS PARA LOS SENSORES FP7001A (T_1) Y SC4A (PT1000)

En el caso del sensor FP7001A el transductor que mide la temperatura T_1 viene acoplado a este sensor de flujo, ubicándose a la entrada del sistema. La salida que entrega este sensor de temperatura es una señal de voltaje variable de 10 [mV/°C]. Así mismo, el sensor de conductividad SC4A posee una resistencia de platino PT1000 para la medida de temperatura. Para comprobar la operación de ambos sensores se decidió obtener su curva de respuesta y al mismo tiempo comparar su desempeño con un medidor de temperatura patrón.

4.1.1.1 OBTENCIÓN DE LA CURVA DE RESPUESTA

Con esta prueba se pudo determinar en todo el rango de operación, el comportamiento del sensor y el error correspondiente. Para esta prueba el sensor patrón fue el sensor de temperatura del conductivímetro YSI 30 que presenta una precisión en la medición de temperatura de +/- 0.1 [°C] (48).

La recolección de datos se lo realizó en el LEAEE de la FIM de la EPN⁸, donde los sensores FP7001A, el sensor SC4A y el electrodo del conductivímetro YSI fueron dispuestos de tal manera que estén en el mismo calorímetro. Las condiciones para la prueba fueron elevar la temperatura del agua a 50 [°C] y tomar medidas cada minuto, para sacar el promedio del mismo, hasta que la temperatura del agua llegue a la del ambiente. Los valores antes mencionados fueron recolectados por el sistema de adquisición de datos y los valores patrón se obtuvieron del conductivímetro YSI 30. Los resultados obtenidos se muestran en la **Figura 4.1**.

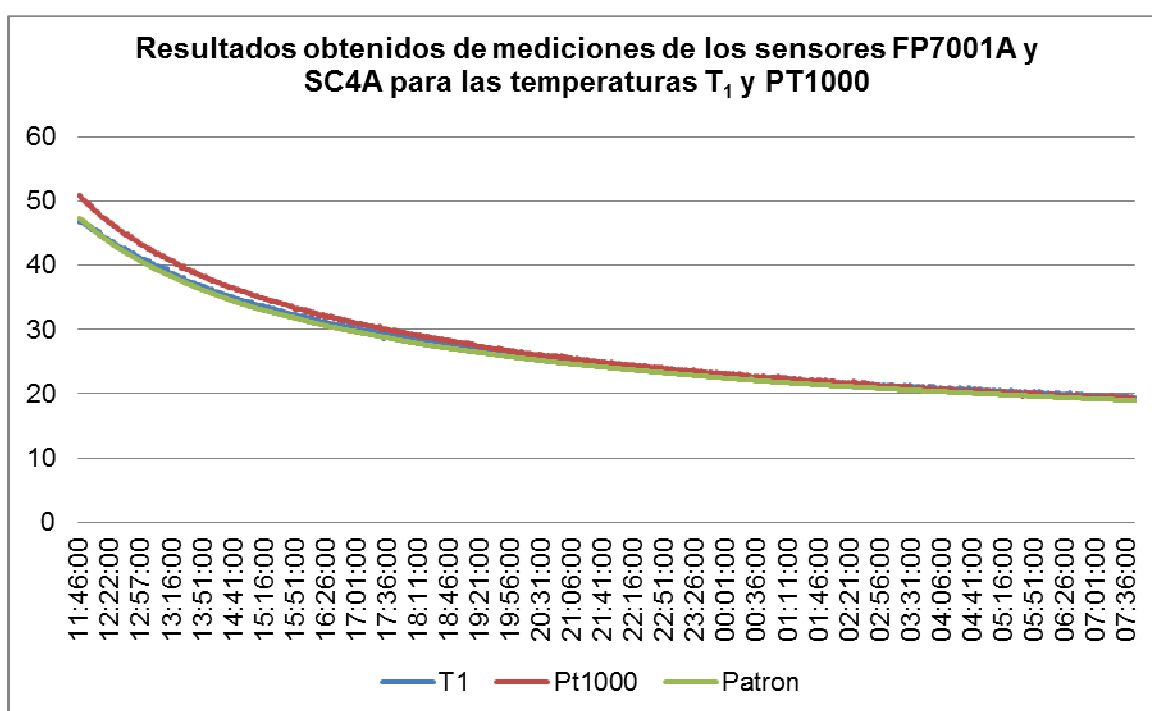


Figura 4.1 Resultados obtenidos de mediciones de los sensores FP7001A y SC4A para las temperaturas T_1 y PT1000

Los resultados obtenidos de la curva se muestran dentro del rango de operación de los sensores. Para la temperatura T_1 se tiene un error relativo máximo del 5 [%] equivalente a un error máximo de 1 [°C], que a su vez corresponde a la precisión del sensor FP7001A (20). Adicionalmente, el error relativo promedio es del 2 [%] equivalente a un error de ± 0.5 [°C], calculados de 1200 mediciones recolectadas.

⁸ Escuela Politécnica Nacional

Para el sensor SC4A (PT1000) se registró un error máximo a altas temperaturas, siendo un 7 [%], que representa una desviación de 3.5 [°C]. Pero en el rango de 20 a 30 [°C] la correspondencia es notable y el error baja. Se presentó un error relativo promedio de 4 [%] comparado con el patrón resultando un promedio de 1 [°C].

4.1.2 PRUEBAS PARA TERMOCUPLAS (T_2 - T_9)

Para los sensores de las temperaturas de la T_2 a la T_9 se realizaron mediciones de contraste con el termómetro patrón Fluke para verificar su comportamiento. La característica en común de estos sensores de temperatura es que son termocuplas tipo J y utilizan el mismo acondicionamiento. A continuación se obtienen las curvas de respuesta para cada uno de los sensores.

4.1.2.1 OBTENCIÓN DE CURVAS DE RESPUESTA

Mediante esta prueba se busca comprobar el funcionamiento correcto de las termocuplas en su estado normal de operación, de manera que se dispone de 3 termocuplas donde 2 de ellas van conectadas a las entradas respectivas para el análisis y una acoplada al termómetro del fabricante Fluke, modelo 52 II. Este instrumento posee una precisión de $\pm 0,05$ [%] o $+ 0,3$ [°C] (49).

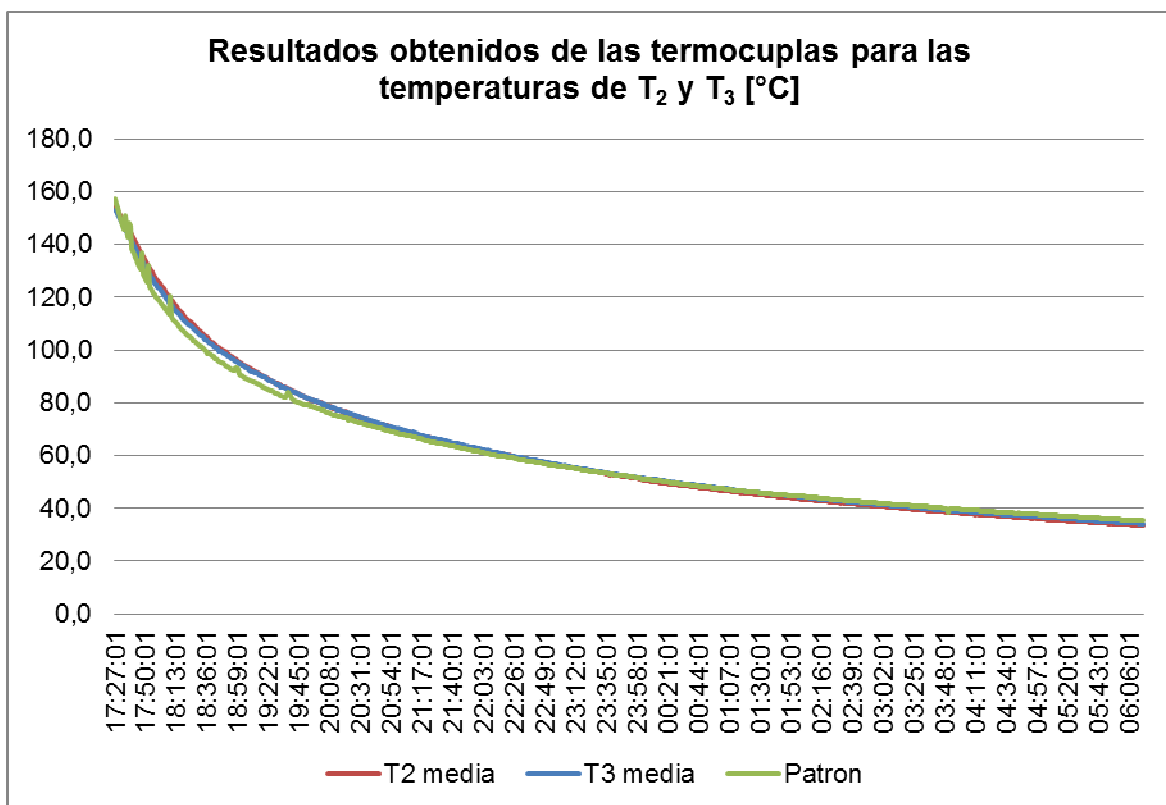
Las pruebas se efectuaron en el LEAEE de la FIM de la EPN donde las 3 termocuplas se ubicaron en un mismo calorímetro. Colocadas las termocuplas se vertió aceite a una temperatura mayor de 150 [°C] dentro del calorímetro. Este procedimiento se realizó para las termocuplas de las temperaturas de T_2 a T_6 ya que cualquiera de las mismas pueden llegar a esta temperatura si se realiza algún intercambio de las termocuplas.

Para las termocuplas de las temperaturas extras T_7 , T_8 y T_9 que poseen el mismo acondicionamiento para 150 [°C], solamente se contrastó con el patrón a más baja temperatura. Las mediciones fueron realizadas cada minuto, durante un periodo de varias horas. En la **Figura 4.2** se tiene la distribución de la termocuplas en el calorímetro y la visualización de la temperatura en el termómetro Fluke 52 II.



Figura 4.2 Disposición de termocuplas

A continuación en la **Figura 4.3** se tienen los resultados de las termocuplas para las temperaturas T_2 hasta la T_6 .



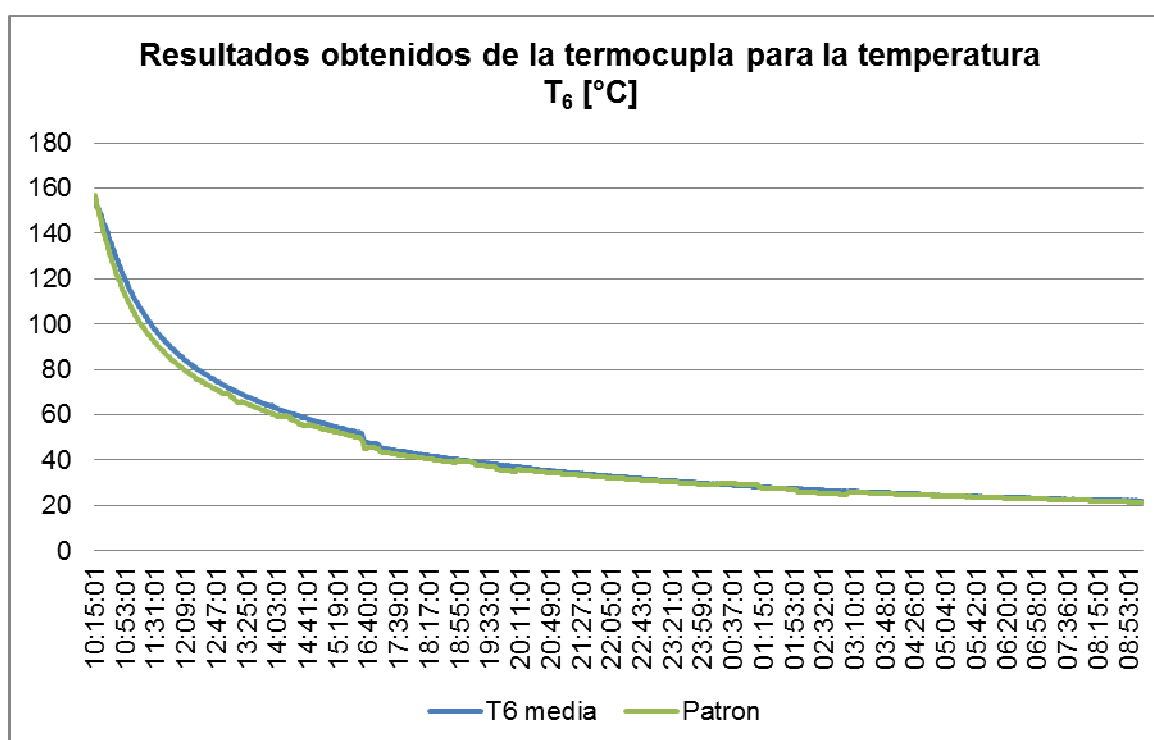
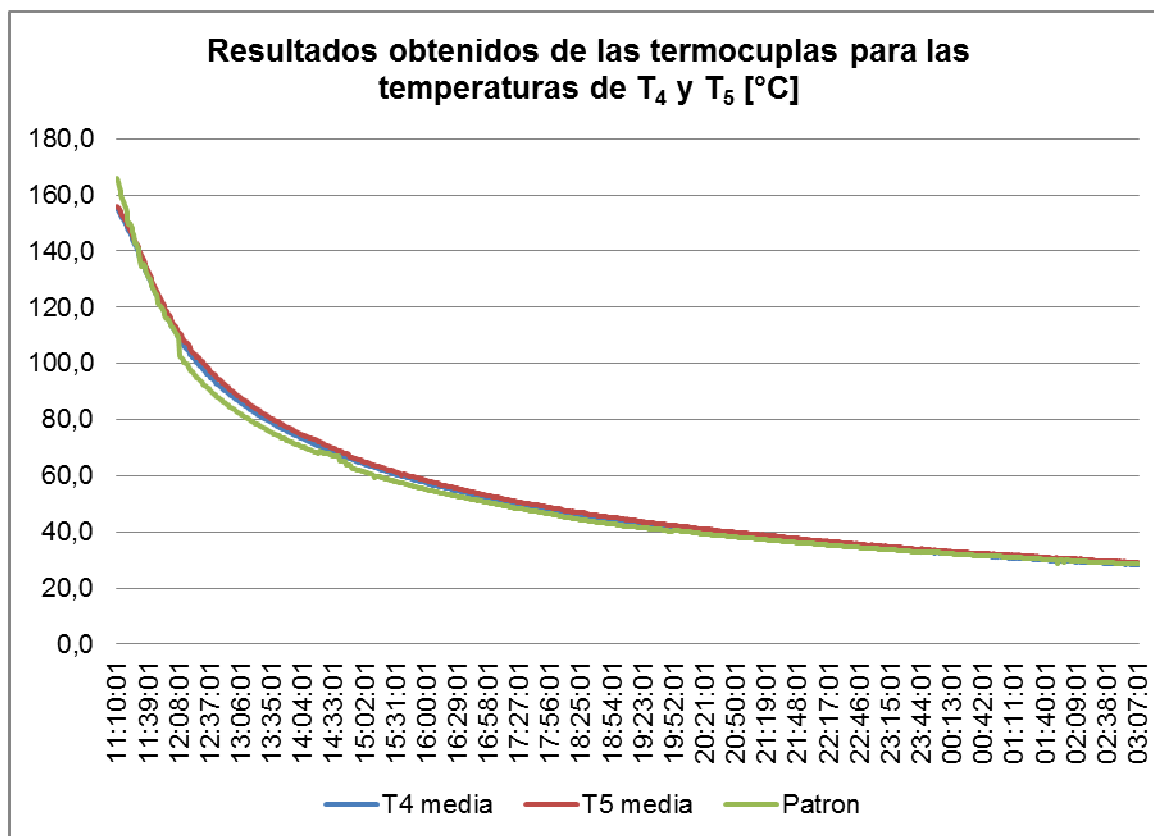


Figura 4.3 Resultados obtenidos de las termocuplas para las temperaturas de T_2 a T_6

El procesamiento de 1000 mediciones demuestra que cumplen con el error dado por el fabricante del amplificador monolítico AD594. Los errores que presenta este integrado para diferentes rangos se encuentran en la **Figura 4.4**.

Ambient Temp. °C	AD594A Temp. Rej. Error °C	AD594A Total Error °C
-55	6.83	9.83
-25	3.23	6.23
0	1.25	4.25
+25	0.00	3.00
+50	1.25	4.25
+70	2.59	5.59
+85	3.75	6.75
+125	7.40	10.40

Figura 4.4 Errores del integrado AD594 (13)

Adicionalmente, para las temperaturas entregadas por una termocupla tipo J en el rango de 0 a 200 [°C] el error indicado por la Norma IEC-584-1982 es de ± 2.5 [°C] o ± 0.75 [%], y para el caso del cable extensor tipo J se tiene un error de ± 2.5 [°C] o ± 1.25 [%].

En resumen, los errores máximos obtenidos para las temperaturas T_2 , T_3 , T_4 , T_5 , T_6 son $\pm 7,1$ [°C], $\pm 5,5$ [°C], $\pm 10,7$ [°C], $\pm 9,9$ [°C], ± 7.1 [°C], respectivamente. Para el caso de los errores promedios se tiene $\pm 1,8$ [°C], $\pm 1,3$ [°C], $\pm 1,5$ [°C], $\pm 2,4$ [°C] y $\pm 1,5$ [°C]. Por lo tanto, el error máximo obtenido para los diferentes casos está dentro del error que se espera ya sea de la termocupla o del integrado AD594.

Con las termocuplas de las temperaturas T_7 , T_8 , T_9 se obtuvieron los resultados de la **Figura 4.5**

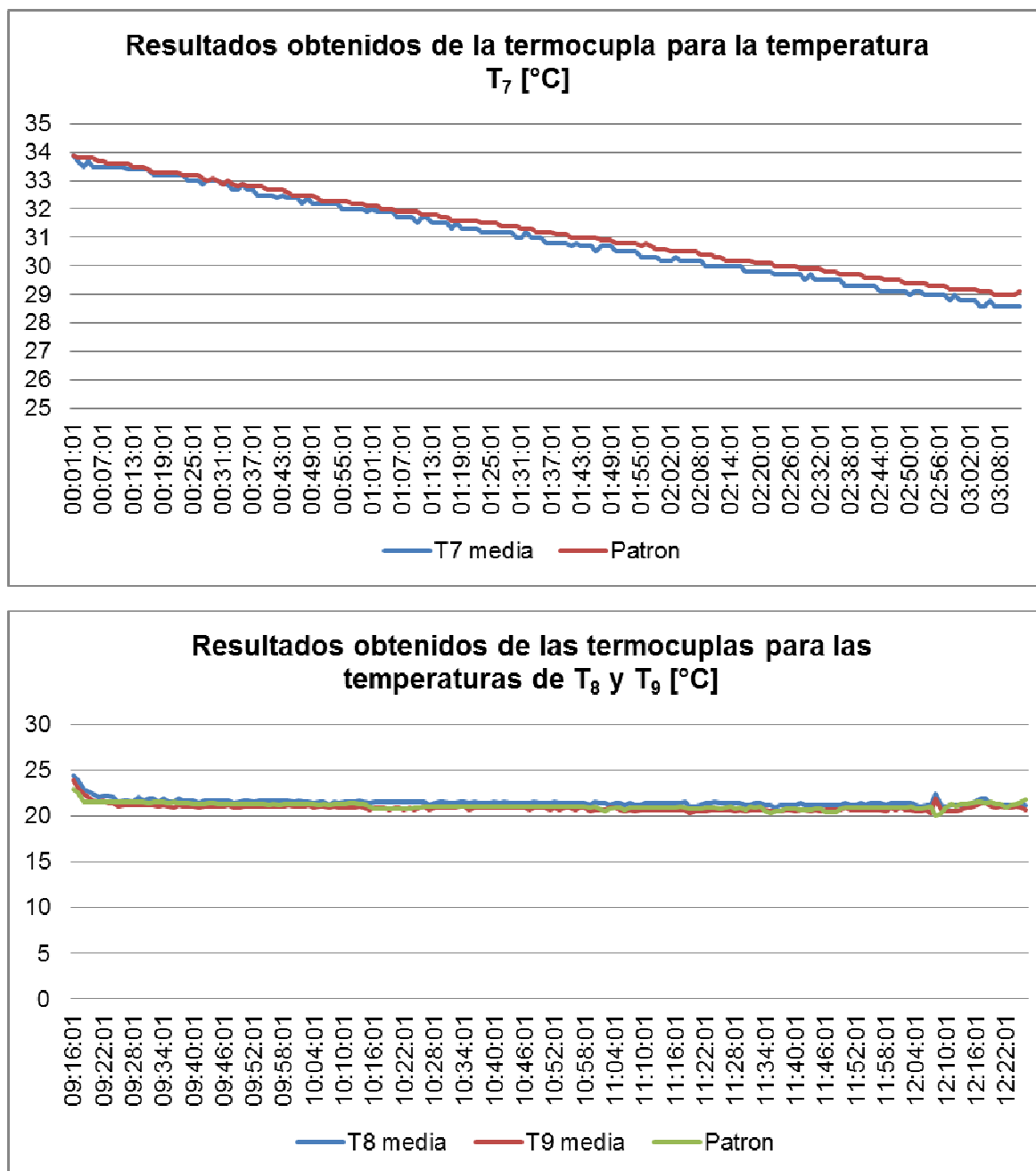


Figura 4.5 Resultados obtenidos de las termocuplas para las temperaturas de T_7 , T_8 , T_9

Estas pruebas se realizaron procurando que la temperatura no cambie durante un cierto tiempo. Así se obtuvieron errores promedio de $\pm 0,3$ [°C], $\pm 0,4$ [°C] y $\pm 0,3$ [°C] del tratamiento de 191 mediciones.

4.1.3 PRUEBA PARA EL SENSOR SHT15

Para verificar el correcto funcionamiento del sensor SHT15 que mide la temperatura ambiente T_A también se realizó la obtención de la curva de respuesta.

4.1.3.1 Obtención de la curva de respuesta

Para el contraste de la temperatura entregada por el sensor SHT15, se utilizó el sensor de temperatura del Termo higrómetro DMA 672 del fabricante LSI Lastem.

Las características que posee el Termo higrómetro para temperatura se tiene en la **Tabla 4.1**.

Tabla 4.1 Características del sensor de temperatura del Termo higrómetro DMA 672

Características	Rango	Unidad
<i>Rango</i>	0 a 100	[°C]
<i>Elemento sensible</i>	PT100 Clase B	
<i>Precisión</i>	+ / - 0.1	[°C]
<i>Resolución</i>	0.06	[°C]

Fuente: Tomado de la hoja técnica (42)

La prueba fue realizada en el LEAEE de la FIM de la EPN, donde el sensor SHT15 (T_A) fue dispuesto de tal manera que esté cerca del Termo higrómetro.

La prueba se realizó durante un tiempo de 15,5 horas. Se tomaron mediciones instantáneas cada minuto en un total de 804 mediciones. En la **Figura 4.6** se presenta la disposición de los sensores para la respectiva prueba.

Los resultados obtenidos mediante esta prueba se muestran en la **Figura 4.7**.

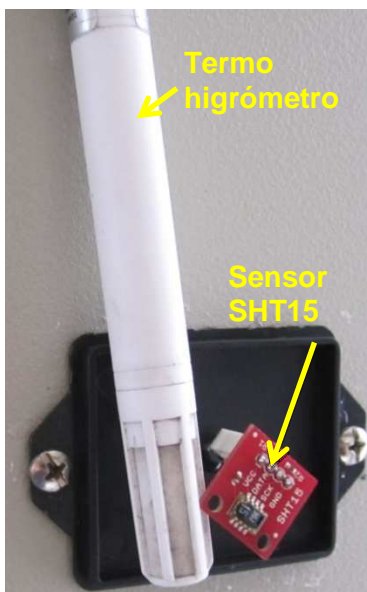


Figura 4.6 Disposición de sensores para medición de temperatura

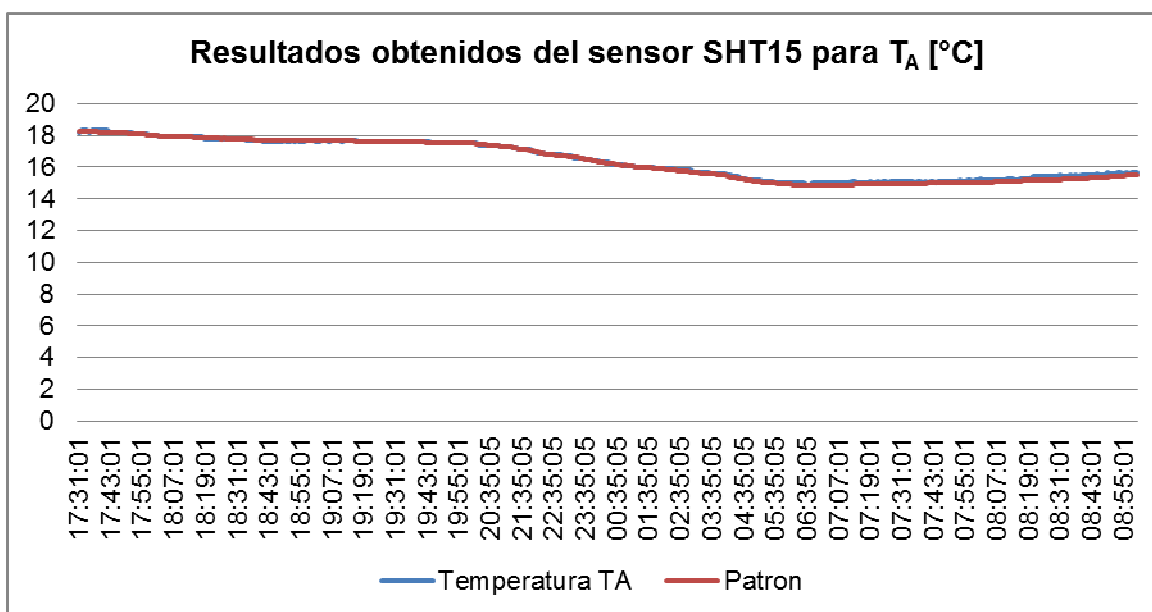


Figura 4.7 Resultados obtenidos del sensor SHT15 para T_A

La curva de la temperatura ambiente T_A se presenta dentro del rango de precisión que posee el sensor SHT15. Presenta una variación muy parecida al valor de precisión del Termo higrómetro DMA 672. Mediante el procesamiento de los valores que se encuentran en el **Anexo 7** se posee un error relativo máximo del 2 [%] que pertenece a un error de 0.31 [°C] y un error relativo promedio de 0.5 [%] equivalente a un error de 0.07 [°C] con respecto al patrón, estando dentro del rango del error dado por el fabricante que es de +/- 0.3 [°C].

4.2 PRUEBAS DE LOS SENSORES HUMEDAD

Para la comprobación de la respuesta de los sensores de humedad de la cámara H_1 del sensor HTF3223 y humedad ambiental H_A del sensor SHT15 se realizó la obtención de las curvas de respuesta.

4.2.1 OBTENCIÓN DE LAS CURVAS DE RESPUESTA

Con esta prueba se buscaba determinar el funcionamiento de los sensores en un estado de normal funcionamiento. Para esto los sensores se colocaron en un mismo punto de manera que se pueden contrastar las medidas que entrega el sensor SHT15 y el Termo higrómetro DMA 672 del fabricante LSI Lastem.

Las características que presenta el Termo higrómetro para humedad se tiene en la **Tabla 4.2:**

Tabla 4.2 Características del sensor de Humedad del Termo higrómetro DMA 672

Características	Rango	Unidad
Rango	0 a 100	[%RH]
Elemento sensible	Capacitivo	
Precisión	1.5 (5-95[%RH]) 2.5 (<5>95[%RH])	[%]
Resolución	0.12	[%]

Fuente: Tomado de la hoja técnica (42)

La prueba se efectuó en el LEAEE de la FIM de la EPN, donde los sensores H_1 y H_A fueron dispuestos de tal manera que estén cerca del sensor del Termo higrómetro.

Las condiciones de las pruebas fueron realizadas en un ambiente relativamente estable propio de un lugar cerrado, durante un tiempo de 12 horas. En la **Figura 4.8** se presenta la disposición de los sensores para determinar la variación de la

humedad en el lugar a lo largo del tiempo. Los resultados se tienen en la **Figura 4.9**.

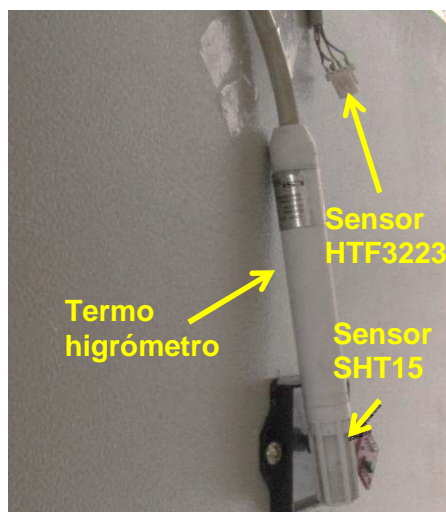


Figura 4.8 Disposición de sensores para medición de humedad

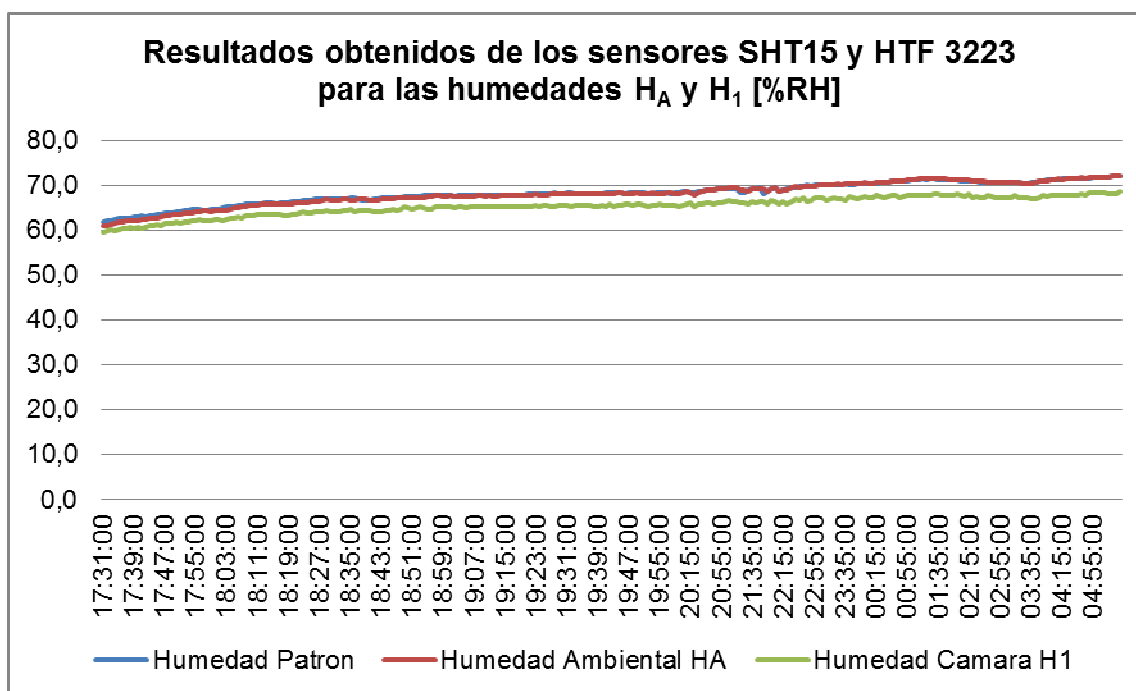


Figura 4.9 Resultados obtenidos de los sensores SHT15 y HTF 3223 para las humedades H_A y H_1

La curva de comportamiento de las humedades resultaron estar dentro del rango de precisión que poseen los sensores, siendo que el sensor SHT15 entrega un valor de humedad muy similar al valor de humedad del Termo higrómetro DMA 672. Con el procesamiento de los valores del **Anexo 1** se pudo observar que se

posee un error relativo máximo del ± 1.8 [%], que en humedad relativa se traduce a ± 1.1 [%RH] con respecto al patrón, estando dentro del rango del error dado por el fabricante del ± 2 [%RH]. Para el valor de la humedad entregada por el sensor HTF3223 se tiene un error relativo máximo del ± 5.4 [%] traducido a una humedad relativa máxima de $\pm 3,9$ [%RH] extraído del procesamiento de los datos del **Anexo 2**, lo cual representa un valor dentro del error típico de humedad dado por el fabricante de ± 5 [%RH].

4.3 PRUEBAS DEL SENSOR DE RADIACIÓN 6450

Para medir la respuesta de radiación R_1 dado por el sensor de Radiación Solar 6450 se obtuvo la respectiva curva de respuesta.

4.3.1 OBTENCIÓN DE CURVA DE RESPUESTA

La finalidad de esta prueba es verificar el comportamiento del sensor del sistema de adquisición de datos frente al Radiómetro Global DPA 453 de la marca LSI Lastem.

Las características que presenta el Radiómetro Global para radiación se tiene en la **Tabla 4.3**:

Tabla 4.3 Características del Radiómetro Global DPA 153

Características	Rango	Unidad
<i>Rango</i>	0 a 2000	[W/m ²]
<i>Precisión</i>	+ / - 20	[W/m ²]
<i>Respuesta de Tiempo</i>	95	[%]

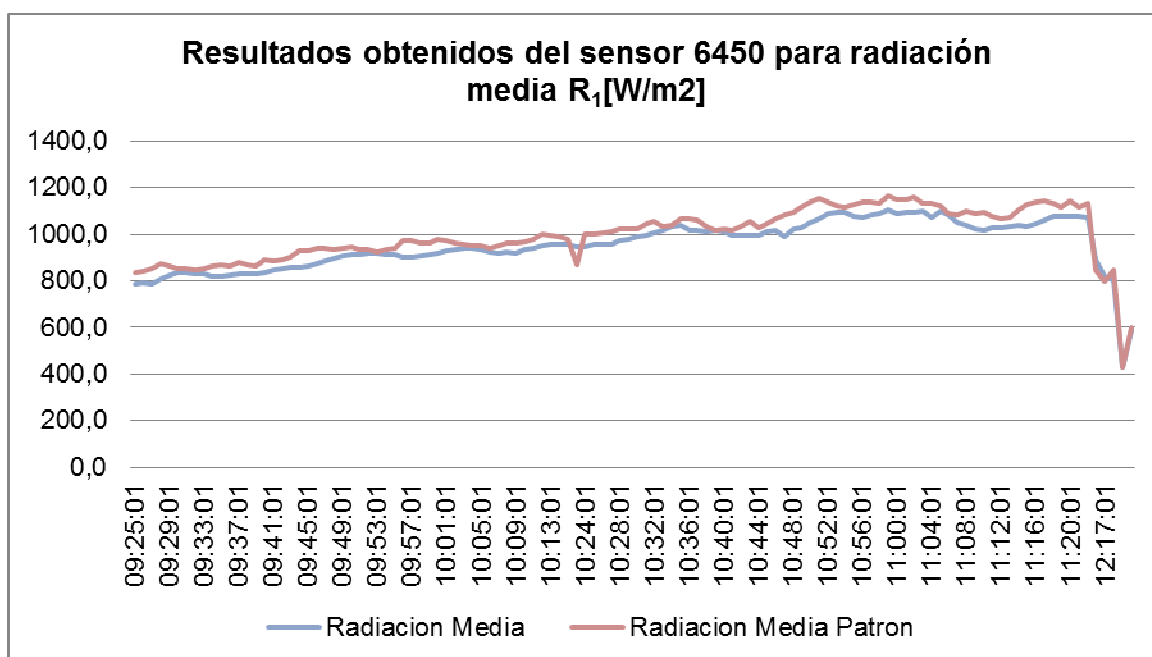
Fuente: Tomado de hoja técnica (43)

La prueba se realizó en la LEAEE de la FIM y la disposición de ambos sensores se muestra en **Figura 4.10**. Las pruebas fueron realizadas durante un día soleado por un lapso aproximado de 3 horas. Las mediciones se realizaron extrayendo el promedio cada minuto de los valores instantáneos registrados cada 4 segundos.

Esta prueba mide la variación de la radiación solar en el lugar dispuesto a lo largo del tiempo. Los resultados se tienen en la **Figura 4.11**.



Figura 4.10 Disposición de sensores de Radiación



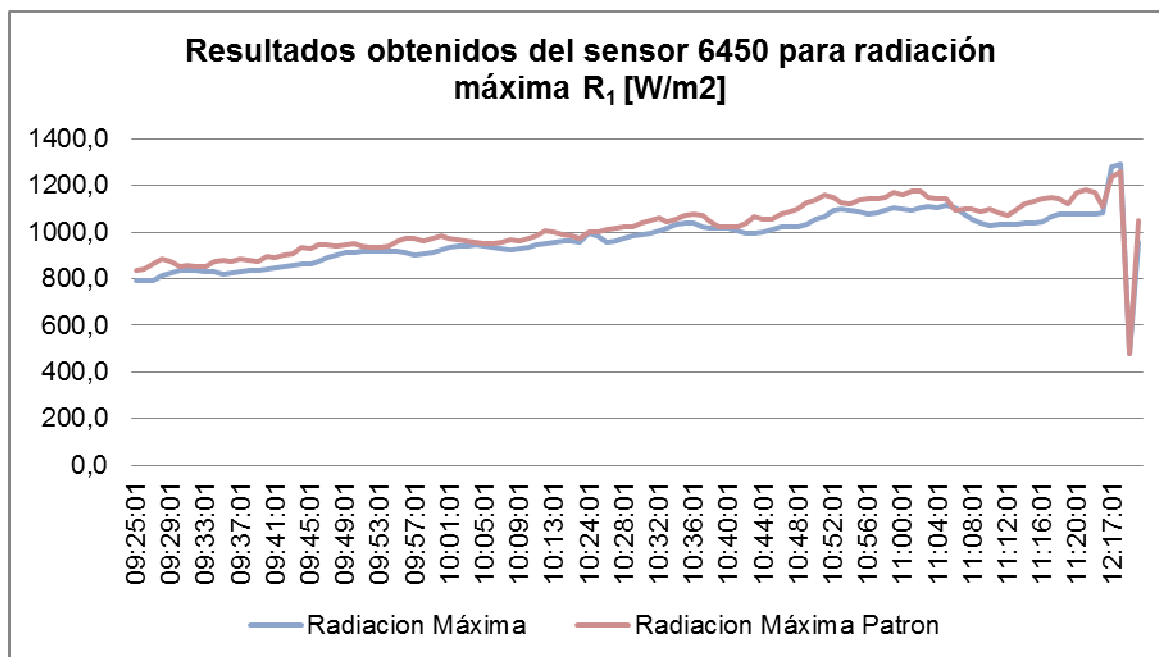


Figura 4.11 Resultados obtenidos del sensor 6450 para radiación R_1

La curva de tendencia de los datos de radiación se presenta dentro del rango de precisión especificado para el sensor. Con el procesamiento de los valores que se encuentran en el **Anexo 2** se obtiene un error relativo máximo del 9 [%] equivalente a un error de ± 99 [W/m²] tanto para la lectura de radiación media y máxima. Para los valores de error relativo promedio se tiene respectivamente 4 [%] y 5 [%] equivalentes a errores promedio de ± 44 [W/m²] y ± 47 [W/m²]. Hay que denotar que el sensor de radiación 6450 tiene un error del 5 [%] del valor de escala completa que equivale a ± 90 [W/m²] por lo que afectará al error en mayor grado a mediciones de baja radiación. Adicionalmente, el error máximo presentado por las mediciones de radiación es cercano al error dado por el fabricante y es causado en puntos donde la radiación cambia abruptamente durante el minuto de medición.

4.4 PRUEBAS DEL SENSOR DE CONDUCTIVIDAD SC4A

Para la verificación del correcto funcionamiento del sensor conductividad SC4A se obtuvo la respectiva curva de respuesta en contraste con el conductivímetro Hach Sension 7.

4.4.1 OBTENCIÓN DE LA CURVA DE RESPUESTA

El propósito de esta prueba fue determinar la respuesta del sensor SC4A con respecto al patrón dado por el conductivímetro comercial Hach.

Las principales particularidades de este instrumento se detallan en la **Tabla 4.4**.

Tabla 4.4 Características del Conductivímetro Hach Sension7

Rango	Resolución	Unidad	Precisión
0,00 - 19,99	0,01	[uS/cm]	+/- 5 [%]
20,00 - 199,9	0,1	[uS/cm]	+/- 5 [%]
200,00 - 1999	1	[uS/cm]	+/- 5 [%]

Fuente: Tomado de la hoja técnica (30)

La toma de mediciones se realizó en el LEAEE de la FIM. Las condiciones de la experimentación fueron que a una dosis de agua destilada se aumenta una cierta cantidad de sal para aumentar la conductividad del agua que se traduce en una baja de resistencia al paso de la corriente eléctrica. Los datos se tomaron cada minuto ya que las variables solo cambian con el aumento de la dosificación de sal. En la **Figura 4.12** se disponen los electrodos para la medición de conductividad.

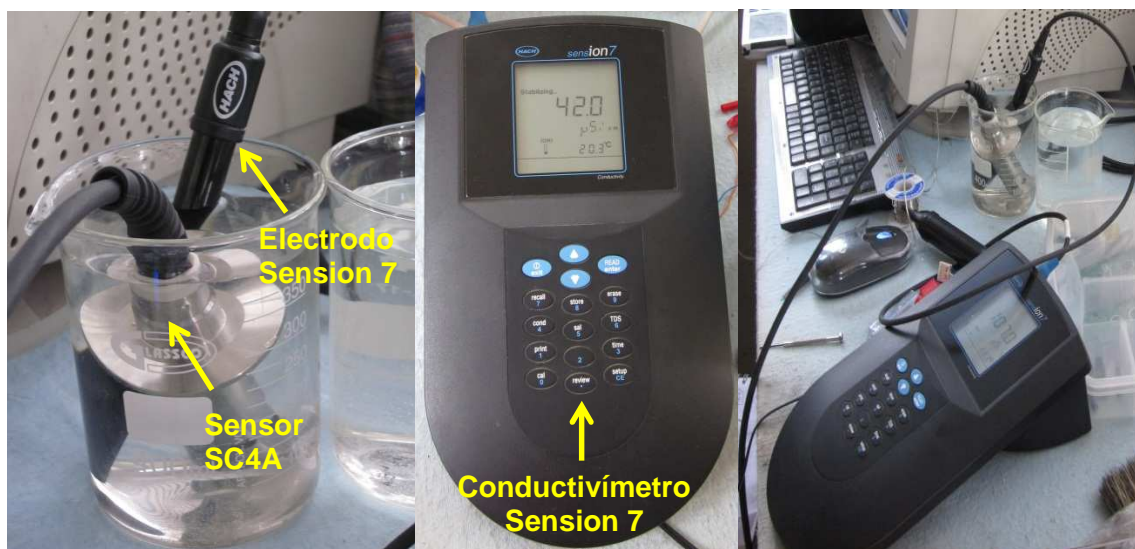


Figura 4.12 Disposición de sensores de Conductividad

Los resultados obtenidos se muestran en la **Figura 4.13**.

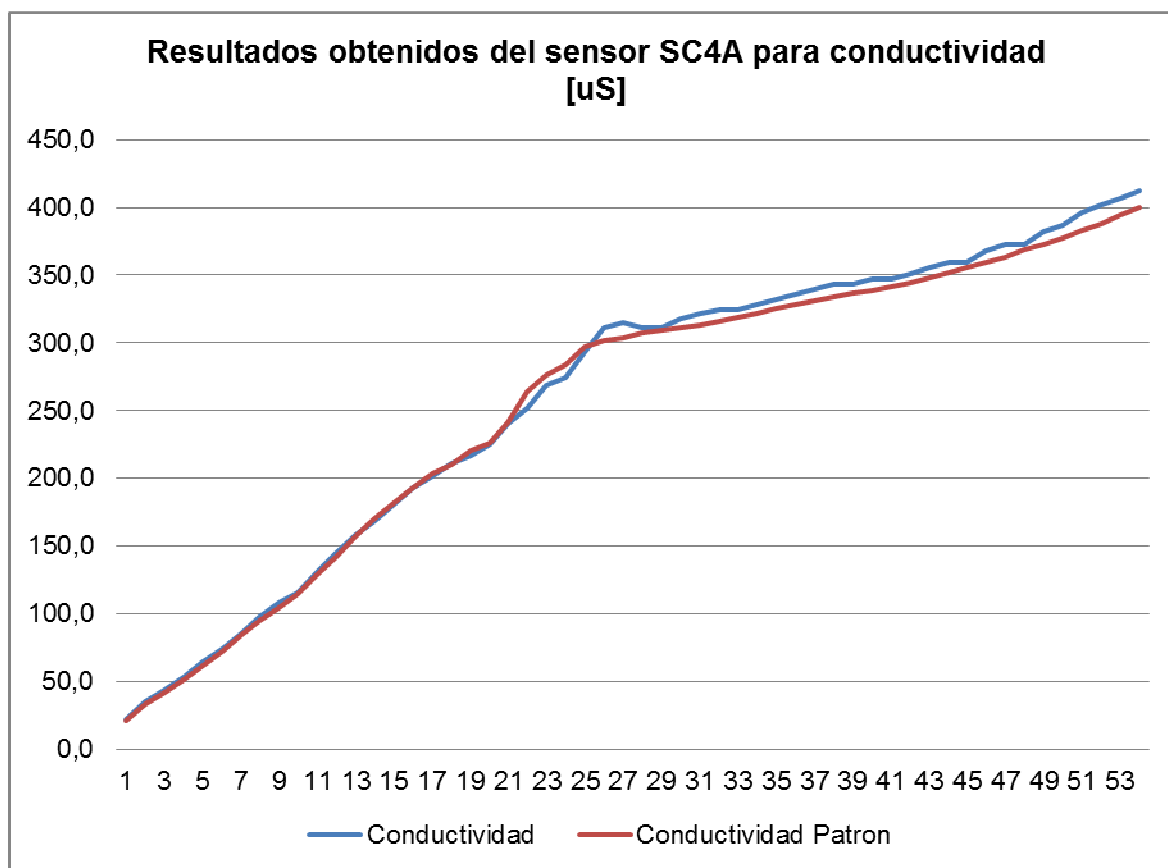


Figura 4.13 Resultados obtenidos del sensor SC4A para Conductividad

La curva de respuesta del sensor de conductividad SC4A sigue la del conductivímetro Hach. Con el procesamiento del **Anexo 3** se obtiene un error relativo máximo del 7 [%] siendo un error máximo de ± 13.6 [μS] con respecto al patrón y un error relativo promedio del 2 [%] que se traduce en un error promedio de ± 5.6 [μS]. Esto se debe a que altas conductividades el voltaje entregado por el divisor de voltaje es bajo por lo que la resolución del conversor A/D toma valores repetidos. Para los rangos normales de conductividad entre 100 [μS] y 250 [μS] se tienen errores más bajos en un rango del 1 [%] al 3 [%].

4.5 PRUEBAS DE LOS SENSORES PARA MEDICION DE FLUJO

En la verificación de la respuesta del sensor FP7001A que mide el flujo F_1 y del sensor FP5600 que mide el flujo F_2 se realizó la obtención de un flujo de referencia para cada sensor ya que no se contó un instrumento patrón de medida.

Mediante la obtención este flujo permitió encontrar el factor K característico de cada sensor y de la instalación. Se comprobó también la medición de flujo entregado por el sistema de adquisición de datos.

Para encontrar el factor K se tuvo que obtener los flujos de referencia de los dispositivos de montaje y tubería para cada sensor, por lo que se procedió a través de una estadística a encontrar un número específico de muestras de flujo con una adecuada precisión.

Para el cálculo de las muestras se trabajó con la **Ecuación 4.1**.

$$n = \frac{Z_{\alpha}^2 (p)(q)}{d^2} \quad (4.1)$$

Donde,

Z_{α} = Coeficiente de nivel de confianza

p = proporción esperada

$q = 1 - p$

d = precisión

Para el cálculo del número de muestras se asume un nivel de confianza del 95 [%] que corresponde a un coeficiente de Z_a de 1,96. En la proporción esperada p es del 1,5 [%] y finalmente se ocupa una precisión del 5 [%] ya que el error máximo permisible en el campo inferior debe ser de ± 5 [%] según la norma NOM-012-SCFI-1994. Resolviendo la **Ecuación 4.1** se tiene que:

$$n = \frac{1.96^2(0.015)(0.985)}{0.05^2} = 23$$

Por lo que las muestras a tomarse son en total 23.

4.5.1 MEDICIÓN DE FLUJO DE REFERENCIA PARA SENSOR FP7001A

La prueba se realizó en el LEAEE de la FIM, donde se procedió a tomar 23 muestras de flujo a través de la medición de la masa de un recipiente y el tiempo de llenado del mismo.

La masa del recipiente se midió por medio de la balanza Sartorius serie BP-4100 de capacidad de 4100 [g] y una resolución de 0,1 [g]. El tiempo se tomo con un cronometro de la marca Hanhart con apreciación en centésimas de segundo.

El flujo durante la prueba fue constante y estaba impulsado a presión fija por una bomba. El flujo promedio determinado es de 0.489 [lt/s] con un error del 1.3%, los datos tomados se encuentran en el **Anexo 4**.

4.5.2 MEDICIÓN DEL FLUJO F_1

Para la medición del F_1 , la prueba se realizo simultáneamente con la obtención del flujo patrón. Se determino inicialmente el factor K promedio del literal anterior, para después multiplicarlo por la frecuencia entregada por el sensor FP7001A.

Los resultados obtenidos del **Anexo 5**, indican que el factor K promedio, que es el resultado de la divisiones de la frecuencia para el flujo patrón promedio es de 0.048 [kg/s]. Este factor K multiplicado por la frecuencia entrega el flujo medido por el sistema de adquisición por lo que el flujo promedio medido es de 0.489 [kgHz⁻¹s⁻¹] con una desviación de 0.016 [kgHz⁻¹s⁻¹] traduciéndose a un error de 0.017 [kg/s] equivalente a un error relativo del 2 [%], el cual esta dentro de la precisión de 5 [%] que exige la norma NOM-012-SCFI-1994.

4.5.3 MEDICIÓN DE FLUJODE REFERENCIA PARA SENSOR FP5600

Similarmente al literal 4.5.1 se realizó la prueba para medición del flujo patrón para el sensor FP5600. La prueba se mantuvo con un flujo de presión y velocidad constante aportada por una bomba y simultáneamente se tomaban los datos de frecuencia que entrega el sensor FP5600. Adicionalmente de un recipiente se midió su masa como su tiempo de llenado.

Del tratamiento de los datos del **Anexo 6** se tiene un flujo patrón promedio de 0,239 [lt/s] con un error de 0,002 equivalente a un error relativo del 1 [%].

4.5.4 MEDICIÓN DEL FLUJO F₂

Mediante el procesamiento del **Anexo 7** se encontró el factor K promedio 0.004 [kgHz⁻¹s⁻¹] con un error de 0.0002 [kgHz⁻¹s⁻¹] que equivale a un error relativo de 5 [%]. El flujo medido promedio entregado por el sistema de adquisición de datos es de 0.239 [kg/s] con un error de 0.011 [kg/s] que equivale a un error relativo del 4.5 [%] que esta dentro de lo que exige la norma NOM-012-SCFI-1994.

4.6 PRUEBAS DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Las pruebas del sistema de adquisición de datos se realizaron en un periodo de tiempo determinado con el objetivo de encontrar la eficiencia tanto del captador solar con cubierta como del sistema solar termosifón de las mediciones efectuadas. Estas pruebas se desarrollaron bajo los ensayos de rendimiento dados por la norma UNE-EN 12975-2:2006.

4.6.1 EFICIENCIA DEL CAPTADOR SOLAR CON CUBIERTA

Del ensayo realizado se obtuvieron las mediciones del sistema de recolección de datos y se procesaron para obtener el resultado de eficiencia.

4.6.1.1 Radiación

En la **Figura 4.14** se encuentra las mediciones de radiación media obtenida por el sistema de adquisición de datos.

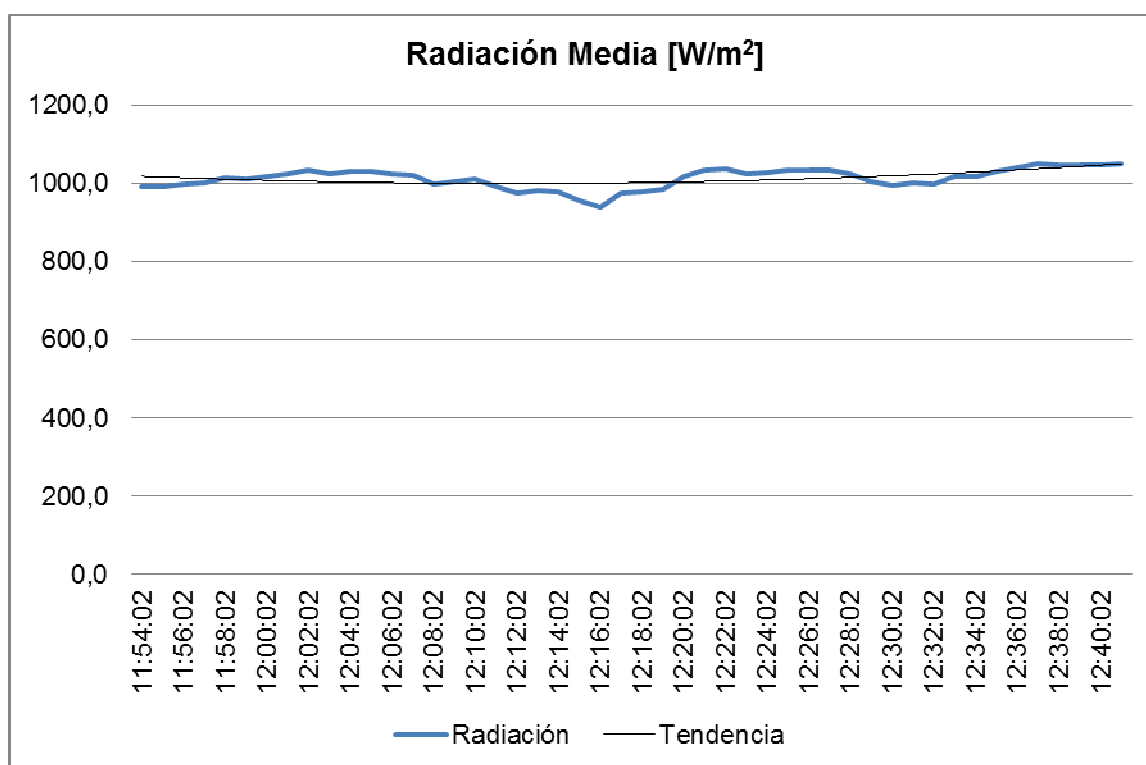


Figura 4.14 Mediciones de radiación

La radiación media obtenida fue de 1013,2 [W/m²].

4.6.1.2 Temperatura

En la **Figura 4.15** se encuentra las mediciones de temperatura a la entrada y salida del colector obtenida por el sistema de adquisición de datos.

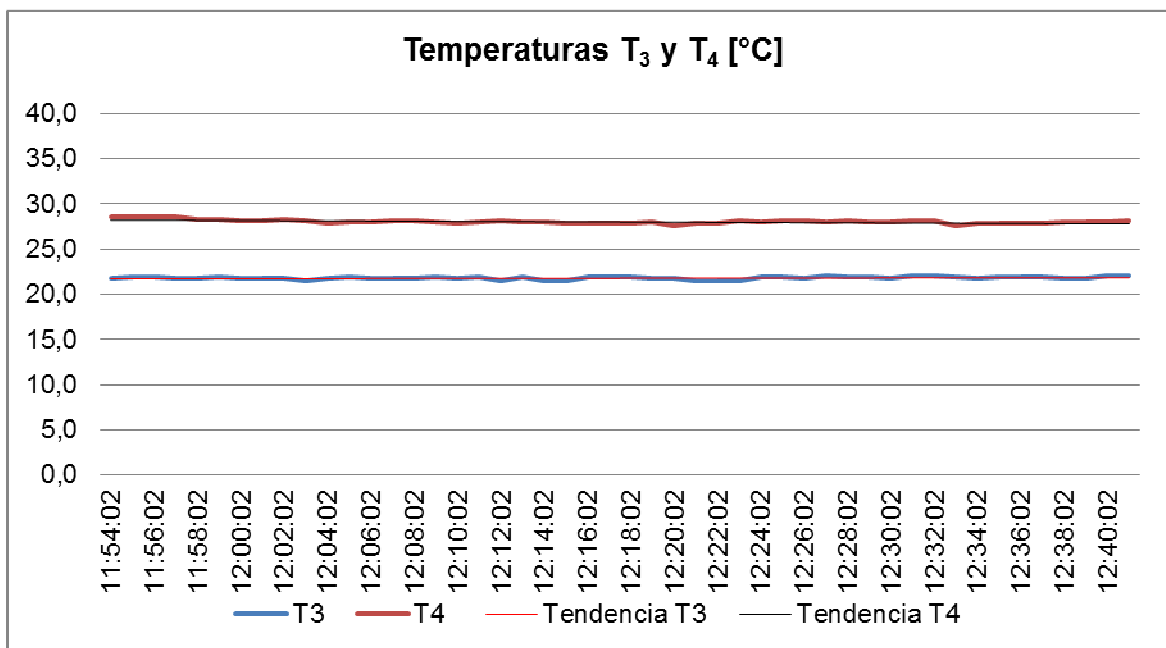


Figura 4.15 Mediciones de temperatura de entrada de agua al colector (T₃) y salida de agua del colector (T₄)

La temperatura promedio de entrada de agua al colector (T₃) fue de 21,8 [°C] y la temperatura promedio de salida de agua del colector (T₄) fue de 28 [°C].

4.6.1.3 Flujo

En la **Figura 4.16** se encuentran las mediciones de flujo F_2 obtenidas a la salida del colector, tendiendo un flujo másico promedio de 0,062 [kg/s]

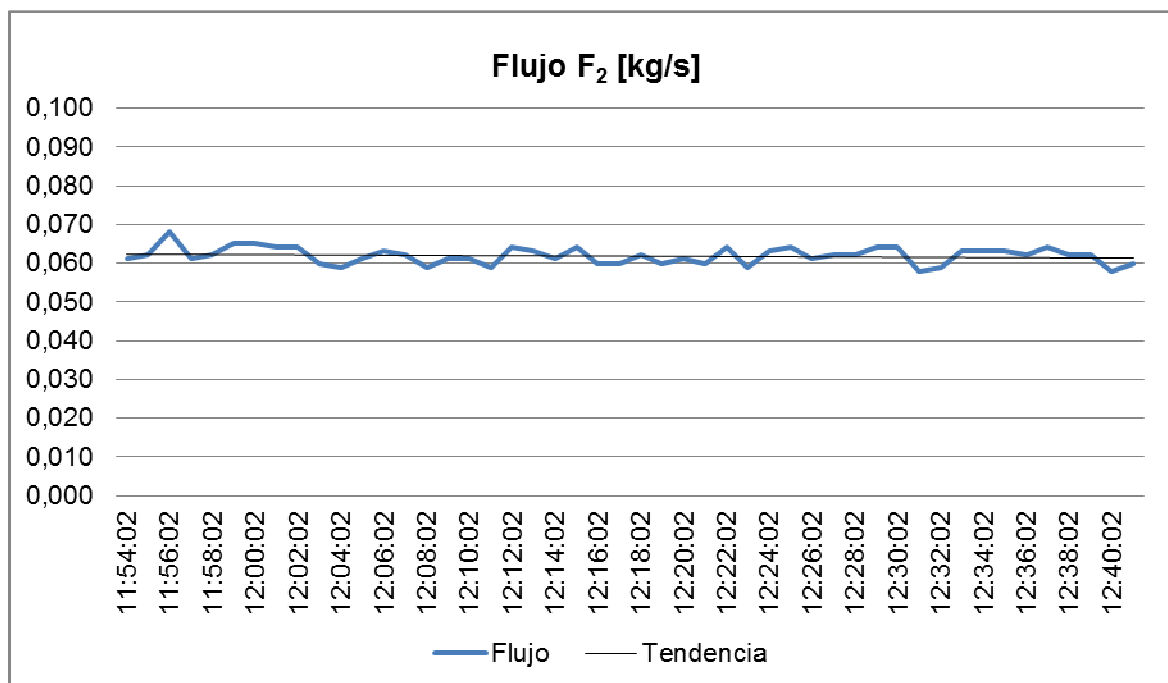


Figura 4.16 Mediciones de flujo másico de salida de agua del colector solar

4.6.1.4 Resultados obtenidos

Para obtener la eficiencia del captador solar con cubierta es necesario definir la eficiencia como:

$$n = \frac{\dot{Q}}{A_A \cdot R_s \cdot \sigma \cos \theta} \quad (4.2)$$

$$\dot{Q} = \dot{m} C_p \Delta T \quad (4.3)$$

Dónde:

- n = Eficiencia instantánea [%]
- \dot{Q} = Potencia extraída [W]
- A_A = Área del absorbedor [m²]

- R_1 = Radiación [W/m^2]
- \dot{m} = Flujo (F_2) [Kgs^{-1}]
- C_p = Calor específico del agua [$\text{J}/(\text{°C}\cdot\text{Kg})$]
- ΔT = Diferencia de temperatura ($T_4 - T_3$) [°C]
- θ = Angulo de inclinación del captador

La área de absorbedor usado para el ensayo es de $1,94 \text{ [m}^2\text{]}$ por lo que la potencia extraída bien dada en la **Figura 4.17**, estando en una potencia promedio de $1616,3 \text{ [W]}$. Finalmente encontrando la eficiencia instantánea para una radiación de $1013,2 \text{ [W}/\text{m}^2\text{]}$ se tiene la **Figura 4.18** con una eficiencia promedio del 83 [\%]

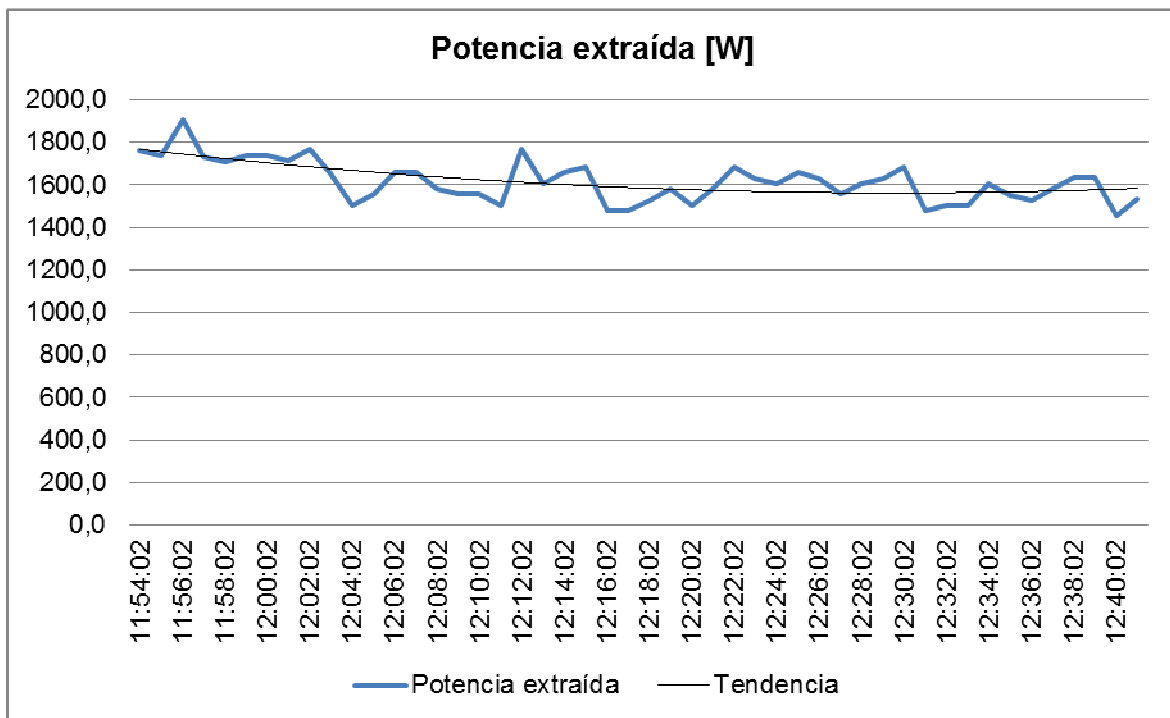


Figura 4.17 Curva de potencia extraída del colector solar

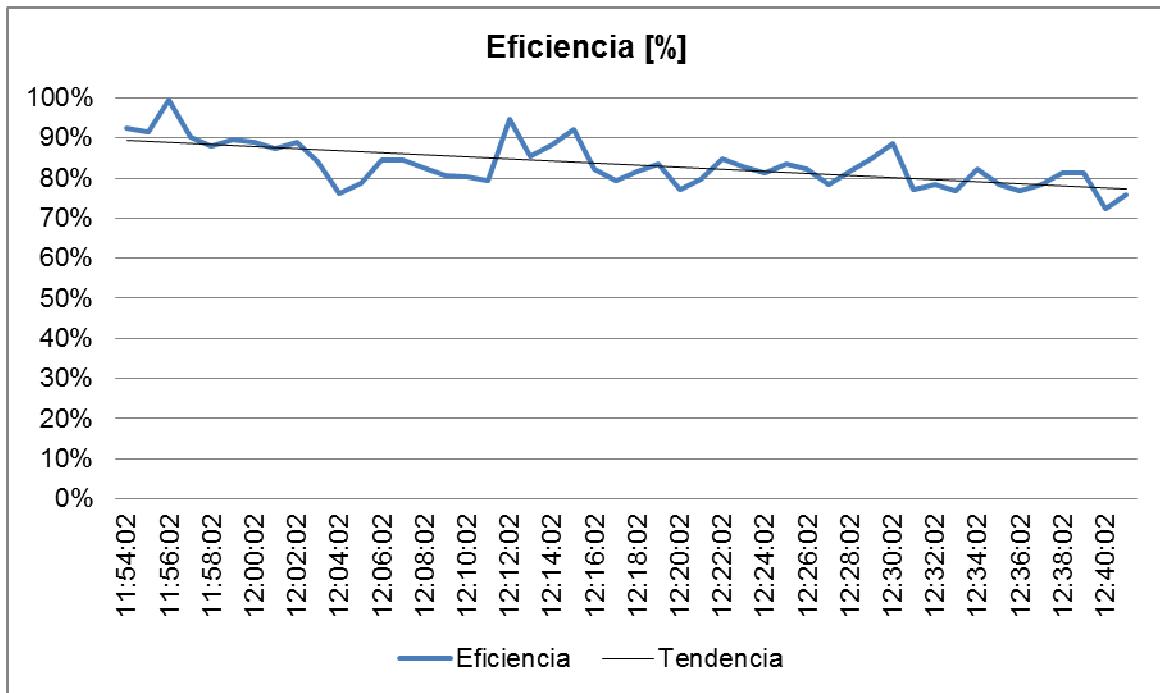


Figura 4.18 Curva de eficiencia instantánea para una radiación de $1013,2 \text{ [W/m}^2\text{]}$

4.6.2 EFICIENCIA DEL SISTEMA SOLAR TERMOSIFÓN

Del ensayo realizado se obtuvieron las mediciones del sistema de recolección de datos y algunos resultados.

4.6.2.1 Radiación

En la **Figura 4.19** se encuentran las mediciones de radiación media obtenida por el sistema de adquisición de datos

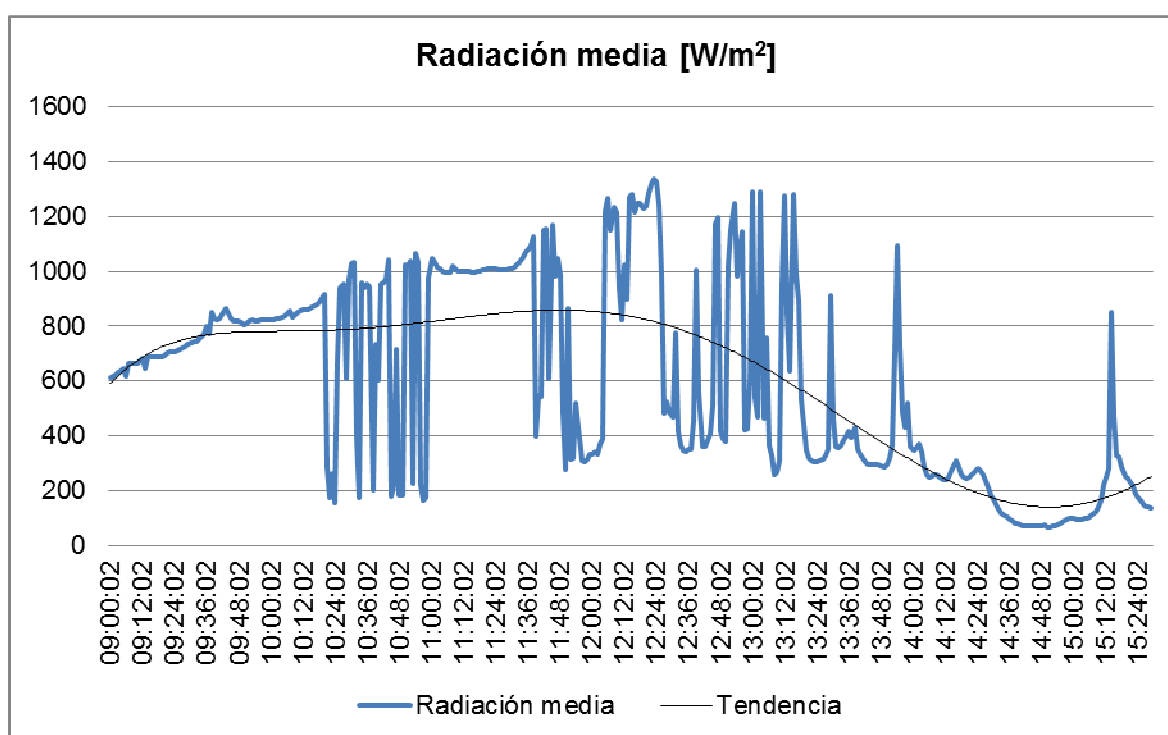


Figura 4.19 Curva de radiación

La radiación máxima obtenida fue de 1335 [W/m^2] y el estado del clima en el ensayo fue parcialmente nublado.

4.6.2.2 Temperatura

En la **Figura 4.20** se encuentra las mediciones de temperatura superior e inferior del tanque, teniendo una temperatura superior del tanque máxima (T_2) de 47,1 [$^{\circ}C$] y una temperatura de ingreso del agua (PT1000) de 19,1 [$^{\circ}C$]

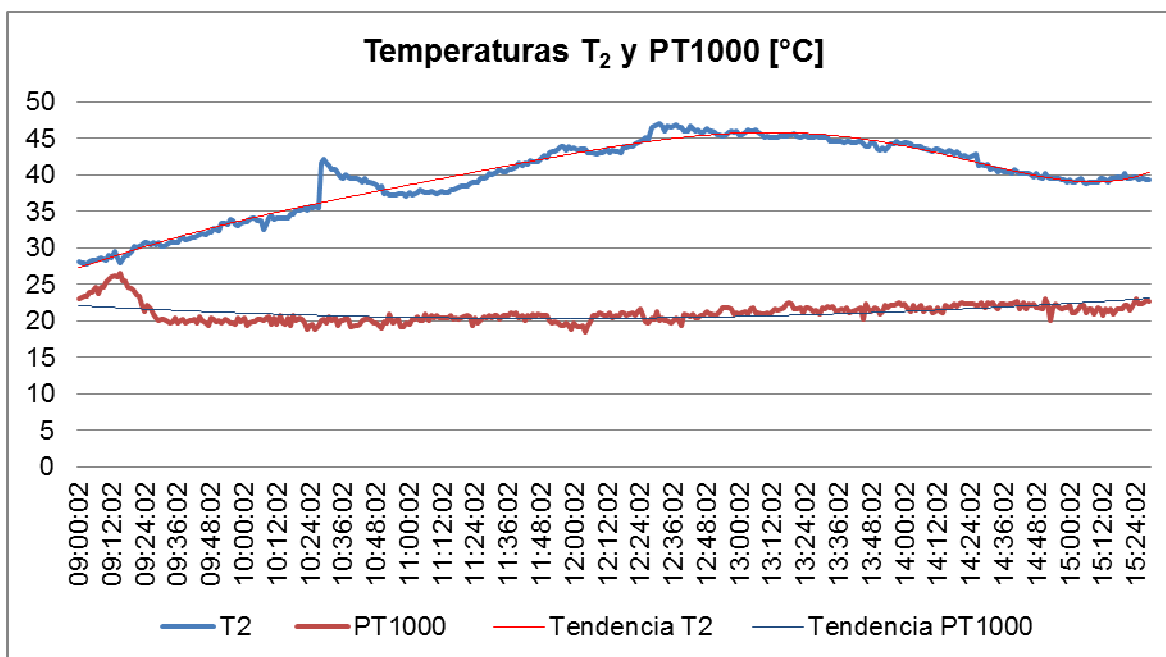


Figura 4.20 Mediciones de temperatura superior del tanque (T_2), inferior del tanque (PT1000)

En la **Figura 4.21** se tienen las mediciones de temperatura de entrada y salida de agua del colector y también las temperaturas superficial y posterior del captador.

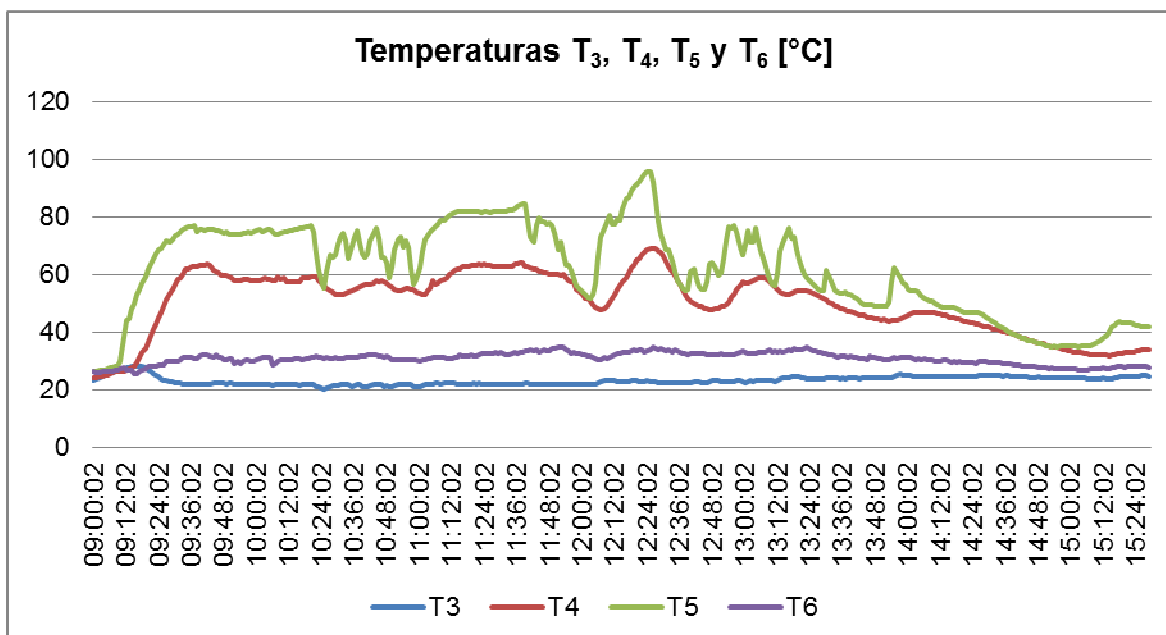


Figura 4.21 Mediciones de temperatura de entrada de agua al colector (T_3), de salida de agua del colector (T_4), temperatura superficial de la placa colectora (T_5) y temperatura posterior del colector solar (T_6)

La temperatura superficial de la placa colectora máxima (T_5) fue de 95,7 [°C] y la temperatura de salida de agua del colector máxima (T_4) fue de 69,1 [°C]

4.6.2.3 Resultados obtenidos

Para obtener la eficiencia del sistema solar termosifón es necesario definir la eficiencia como:

$$n = \frac{Q}{R_T} \quad (4.4)$$

$$Q = mC_p\Delta T \quad (4.5)$$

Dónde:

- n = Eficiencia [%]
- Q = Energía almacenada [kJ]
- R_T = Radiación total recibida por el colector [kJ]
- m = Masa de agua contenida en el sistema [Kg]
- C_p = Calor específico del agua [J/(°C*Kg)]
- ΔT = Diferencia de temperatura ($T_{m1} - T_{in1}$) [°C]
- T_{m1} = Temperatura promedio del tanque $\left(\frac{T_2 + PT1000}{2}\right)$ [°C]
- T_{in1} = Temperatura de ingreso del agua [°C]

Por lo que con el procesamiento de los datos obtenidos del sistema de recolección de datos representados en las **Figuras 4.22 y 4.23**, la energía almacenada promedio (Q) fue de 8857,6 [kJ], la radiación total recibida por la placa colectora (R_T) fue de 27490,8 [kJ], el porcentaje de energía aprovechada fue del 32 [%], la potencia promedio generada fue de 378,5 [W] y una eficiencia promedio del 43 [%].

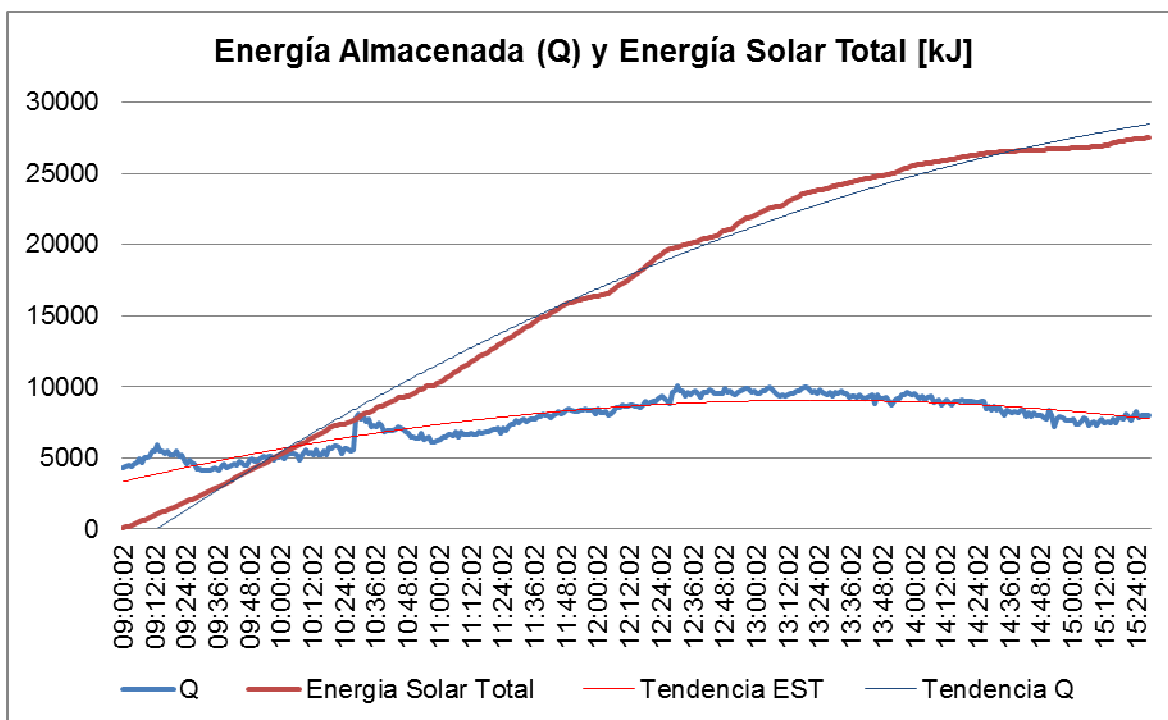


Figura 4.22 Curva de energía almacenada (Q) y energía solar total (EST)

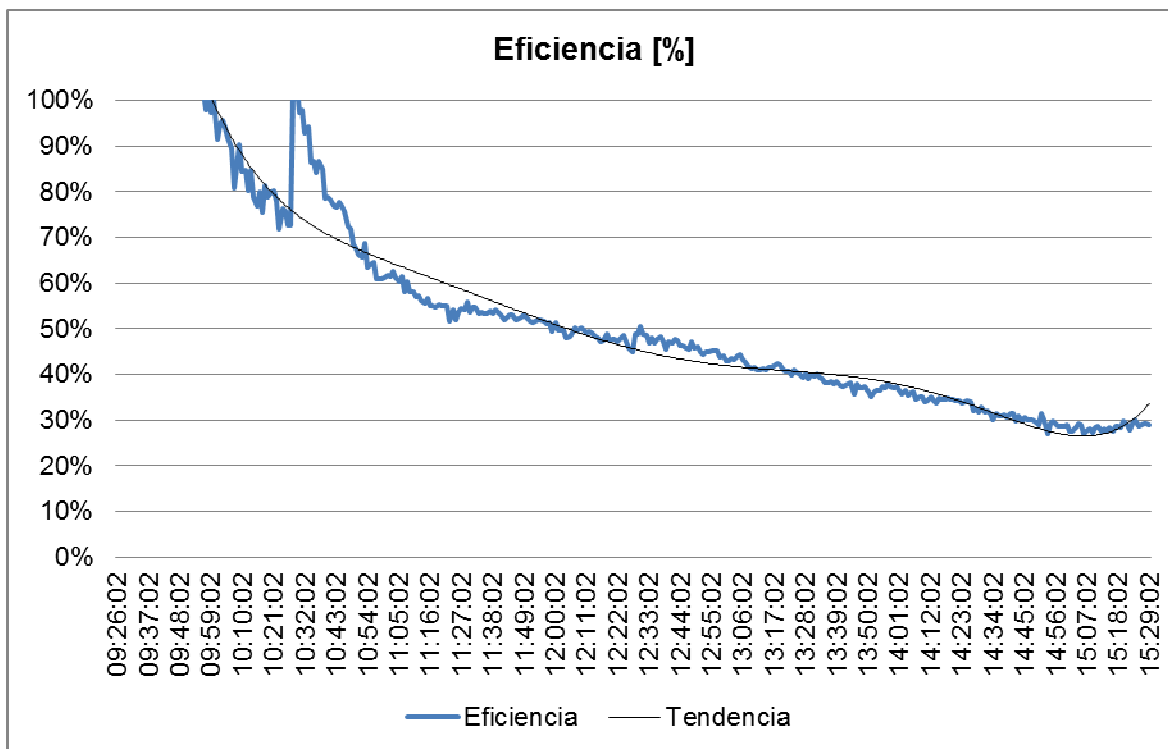


Figura 4.23 Curva de eficiencia del sistema solar termosifón

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- Se implementó un sistema de adquisición y transmisión de datos de un sistema térmico solar para calentamiento de agua bajo las especificaciones del Laboratorio de Energías Alternativas y Eficiencia Energética, el cual permite recabar las variables físicas de temperatura, humedad, radiación, conductividad y flujo.
- El sistema de adquisición y transmisión en cuanto a su construcción fue diseñado de tal manera que se ubique al ambiente, cumpliendo la norma IP66, por lo tanto es un sistema robusto, protegiendo a los circuitos electrónicos impresos correctamente.
- Los diferentes sensores de las variables físicas obtenidas son dispuestos en diferentes lugares del sistema según el requerimiento para los ensayos de eficiencia tanto del captador o colector solar como del sistema térmico solar, en general.
- Para obtener resultados correctos, es indispensable basarse en una norma para la realización de ensayos, y seguir las recomendaciones dadas por la misma en cuanto a la ubicación y la forma en que deben ser colocados los sensores, ya que las medidas registradas pueden ser susceptibles a distorsiones por condiciones ambientales, lo que fue realizado en el presente trabajo.
- Las variables de temperatura difieren en cuanto a su acondicionamiento y pruebas, ya que su montaje y a su rango de medida son específicas para cada ubicación, como se mostró en el capítulo del diseño del prototipo del sistema de adquisición de datos.

- La señal de temperatura dada por el sensor FP7001A posee un rango de medida de 0 [°C] a 100 [°C] y un error máximo de ± 1 [°C] el cual está dentro del rango de precisión del fabricante. Esta temperatura se implementó debido a que es un parámetro esencial en la eficiencia del sistema solar térmica a evaluarse, como se mostró en el capítulo de pruebas y resultados.
- Las señales de temperatura desde T_2 hasta T_9 necesarias para la referencia y evaluación del sistema solar térmico, son proporcionadas por el acondicionamiento de las termocuplas tipo J, teniendo un rango de medida de 0 [°C] a 160 [°C] y errores promedios de $\pm 1,8$ [°C], $\pm 1,3$ [°C], $\pm 1,5$ [°C], $\pm 2,4$ [°C], $\pm 1,5$ [°C] $\pm 0,3$ [°C], $\pm 0,4$ [°C] y $\pm 0,3$ [°C] respectivamente que son valores que están dentro del error permitido por el amplificador monolítico AD594 y las mismas termocuplas y cable extensor, como se indicó en el capítulo de pruebas y resultados.
- La temperatura T_A que interviene en la curva de eficiencia real del sistema solar térmico y en la constante de tiempo del captador solar posee un rango de medida adecuado para la temperatura ambiente y posee un error máximo del 0.31 [°C] que es un valor muy cercano dado por el fabricante de 0.31 [°C], como se indicó en el capítulo de pruebas y resultados.
- Las humedades H_1 y H_A que son variables referenciales cumplen con los rangos de precisión entregados por los fabricantes por lo que el error máximo de humedad para el sensor HT3223 (H_1) es de $\pm 3,9$ [%RH] siendo el entregado por el fabricante del ± 5 [%RH] y el error máximo que presenta el sensor SHT15 (H_A) es de $\pm 1,1$ [%RH] siendo el entregado por el fabricante del ± 2 [%RH], como se mostró en el capítulo de pruebas y resultados.
- La medida de radiación es fundamental en el cálculo de eficiencia por lo que su rango de medida es de 0 [W/m²] a 1600 [W/m²] con un error máximo de radiación media y máxima del ± 99 [W/m²]. El error que presenta el sensor es de ± 90 [W/m²] por lo que el error antes indicado es cercano, pero para el caso de error promedio de la radiación media y máxima esta dentro del error con valores de ± 44 [W/m²] y ± 47 [W/m²] respectivamente, como se mostró en el capítulo de pruebas y resultados.

- La variable referencial de conductividad tiene un rango de operación desde 20 [μS] hasta 400 [μS] con error máximo de ± 13.6 [μS] y un error promedio de ± 5.6 [μS], como se mostró en el capítulo de pruebas y resultados.
- En cuanto a las mediciones de flujo F_1 y F_2 son necesarias para los ensayos de eficiencia teniendo en cuenta que los errores relativos son del 2 [%] y 5 [%] estando dentro de la norma NOM-012-SCFI-1994 que menciona que el error máximo permisible mediciones de bajo flujo debe ser $\pm 5\%$, como se indicó en el capítulo de pruebas y resultados.
- La calibración del sensor de flujo se realizó bajo las condiciones de operación reales. Cada válvula, codo, o arreglo que tiene que ver con la instalación hidráulica sin importar su ubicación puede alterar la medida obtenida por el sensor.
- La transmisión de los datos inalámbricamente se lo logra a través de los módulos RF Xbee que utilizan frecuencia de 868 [MHz] trasportando los datos de la terraza de la Facultad de Ingeniería Mecánica al Laboratorio de Energías Alternativas y Eficiencia Energética ubicado en el segundo piso del edificio de ICB una distancia de 200 [m].
- La visualización de los datos se realiza a través de la interfaz gráfica del software implementado en un computador y también localmente en el colector térmico solar a través del LCD del subsistema de visualización.
- El sistema permite tanto la generación de reportes en Excel a través del HMI generado por el proyecto como el almacenamiento del mismo en una memoria SD, las pruebas realizadas fueron satisfactorias.
- LabVIEW al ser un software de desarrollo para programas de instrumentación y control industrial, tiene una serie de librerías y complementos que facilitan el desarrollo de software como el que se ha elaborado.
- Debido a la gran cantidad de recursos del que dispone el microcontrolador ATMEGA164PA, se ha podido integrar una serie de dispositivos y sensores con diferentes características y formas de comunicación. Para poder realizar

esta integración es necesario hacer trabajar al microcontrolador al máximo de su capacidad, es decir, a 20 [MHz], con cristal externo.

- A pesar de que la temperatura se la considera una variable cuya variación es lenta, el colector solar plano responde rápidamente a los cambios de radiación, lo que se refleja en el valor obtenido de constante de tiempo.
- La potencia instantánea producida por el colector solar plano es elevada en comparación con la potencia producida por el sistema, lo que quiere decir, que las pérdidas en la tubería y especialmente en el tanque son altas. En la tubería, a pesar de que estas se encuentran aisladas, los factores ambientales son los que influyen en que se pierda energía por conducción de calor. En el tanque, debido a la mezcla con agua fría, y a la acción de liberar agua caliente de la válvula de seguridad cuando la presión dentro del tanque es elevada, son los principales factores que hacen que se pierda energía durante el día, y en la noche los factores ambientales son los que hacen que se pierda energía por conducción de calor, a pesar de que el tanque tenga un mejor aislamiento en comparación al que tiene la tubería.
- Los resultados obtenidos en los estudios de eficiencia realizados son preliminares, ya que la norma bajo la cual trabajamos (UNE-EN 12975-2:2006) requiere un periodo de prueba de por lo menos un año. Como el ámbito de nuestra tesis no es evaluar los sistemas solares termosifón, sino elaborar el sistema de monitorización, se presentan estos datos preliminares como válidos.
- Cuando el sistema solar deja de recibir radiación, en la noche, el sistema se pone en equilibrio, cesa el movimiento del agua, el agua se estanca, razón por la cual el agua en el tanque de almacenamiento no pierde mucha energía, pierde aproximadamente un 16% de la energía generada en el día. Tomando en cuenta que la fabricación del tanque es artesanal, esta pérdida de energía es mínima.
- El gobierno nacional debería impulsar utilización de sistemas solares, con la finalidad de reducir las emisiones de sustancias tóxicas al medio ambiente. Si

se llega a dar este impulso, la industria que fabrica este tipo de sistemas puede mejorar los procesos productivos, por tanto mejorar la eficiencia del producto, que de acuerdo a los resultados obtenidos por el sistema de monitoreo elaborado, y los estudios realizados por el Laboratorio de Energías Alternativas y Eficiencia Energética esta alrededor del 45%; esta eficiencia es baja, si se la compara con la eficiencia de sistemas solares similares fabricados en otros países cuyo valor es cercano al 60%.

5.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar un estudio de pérdidas hidráulicas, ya que la colocación de dispositivos de plomería como son llaves, tes y codos tienen una afectación directa a los flujos que circulan por el sistema térmico solar.
- Para mejorar la calidad de los estudios se recomienda la construcción de un simulador de radiación, debido a que para realizar estudios más profundos, se requieren condiciones estables de radiación, a diferentes valores, lo que es imposible de conseguir si se trabaja con la radiación solar natural.
- Es recomendable utilizar los accesorios o complementos fabricados para cada tipo de termocupla, como la señal de voltaje que genera cada termocupla es muy baja, esta es susceptible a grandes cambios con pequeñas fuentes de ruido.
- Ya que la medida de humedad relativa que registran los sensores de humedad depende de la temperatura, se debe observar la curva de funcionamiento con respecto a la temperatura de operación; en nuestro caso, esta compensación se realiza por software mediante ecuaciones dadas por los fabricantes de los sensores.
- Se recomienda instalar un sensor de presión que mida la presión del sistema, con la finalidad de saber cuándo ha existido una liberación de agua caliente por parte de la válvula de seguridad, lo que disminuye la eficiencia del sistema.
- Para evitar el desperdicio de agua en las diferentes pruebas que se realizan al sistema solar, se debería construir un sistema cerrado de pruebas, cuyo propósito debería ser el de poder reutilizar el agua.
- Se debe prever dentro del diseño de un sistema como el elaborado, un factor de expansión del 20%, que significa que se pueden agregar nuevos dispositivos, sensores, funciones de manera sencilla, sin que esto represente un problema si la ampliación se requiere dentro de una etapa media o avanzada del proceso de desarrollo.

- Mientras no existe circulación de agua por el sistema, sus partes constitutivas almacenan energía, una vez el agua empieza a circular esta energía es transferida al agua, por lo que los primeros datos calculados de eficiencia no tienen sentido y se los descarta el momento de realizar un análisis.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS, Energía Renovable.
2. HOLMAN J. P., Transferencia de Calor, Mc Graw Hill, Octava Edición, Madrid, 1998
3. CENGEL YUNUS, Transferencia de Calor, Mc Graw Hill, Segunda Edición, México, 2004.
4. CHAPMAN ALAN, Transmisión del Calor, Editorial Bellisco, Tercera Edición, Madrid, 1984.
5. KERN DONALD, Procesos de Transferencia de Calor, Editorial Continental, Trigésima Primera Reimpresión, México, 1999
6. JARAMILLO ORTIZ ROBERTO EFRAIN, Análisis Térmico de Termosifones Solares, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, 1989.
7. FUENTEALBA GUTIÉRREZROBERTO ENRIQUE, Estudio de factibilidad del uso de colectores solares como apoyo a la caldera de calefacción "CASINO CAMPUS MIRAFLORES", Chile, 2009.
8. GHIA RÍOS DAVID ELÍAS. Diseño y construcción de un conductivímetro digital para medición de conductividad en soluciones con conexión a PC. Escuela Politécnica Nacional, Quito, Septiembre 2007.
9. COUGHLIN ROBERT, DRISCOLL FREDERICK. Amplificadores Operacionales y circuitos integrados lineales. Quinta Edición México. 1998
10. JENNY GADVAY BARZALO, NATAHLY SANCHEZ CHAVEZ, Registrador de Temperaturas con dsPIC. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, 2009.
11. <http://asd-www.larc.nasa.gov/erbe/components2.gif>
12. Hoja técnica del multiplexor/demultiplexor análogo 4052.

<http://pdf1.alldatasheet.com/datasheetpdf/view/50866/FAIRCHILD/4052.html>

13. Hoja técnica amplificador monolítico para termocuplas tipo J AD594

http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD594_595.pdf

14. Hoja técnica sensor de temperatura y humedad ambiental SHT15

http://www.sensirion.com/en/pdf/product_information/Datasheet-humidity-sensor-SHT1x.pdf

15. Hoja técnica del Sensor de Humedad HTF3223

http://www.datasheetcatalog.org/datasheets/150/76494_DS.pdf

16. Hoja técnica. Sensor de Radiación Solar 6450

http://www.davisnet.com/product_documents/weather/spec_sheets/6450_Spec_Rev_E.pdf

17. Hoja técnica del Sensor de Conductividad SC4A

http://www.yokogawa.com/us/is/downloads/pdf/analytical/CONDUCPDF/IM/SC4A_IM_06.pdf

18. Hoja técnica de generador de ondas XR2206

http://www.jaycar.com.au/images_uploaded/XR2206V1.PDF

19. Hoja técnica del amplificador operacional TL084

<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/stmicroelectronics/2301.pdf>

20. Hoja técnica del sensor de flujo FP7001A

<http://www.omega.com/manuals/manualpdf/M1550A.pdf>

21. Hoja técnica del sensor de flujo FP5600

<http://www.omega.com/Manuals/manualpdf/M2978.pdf>

http://www.omega.com/pptst/FP5600_8500A.html

22. Tablas de referencia de la termocupla tipo J

<http://www.omega.com/temperature/z/pdf/z203.pdf>

23. Hoja técnica del microcontrolador ATmega 164 PA

http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/8011S.pdf

24. Hoja técnica del reloj serial en tiempo real DS1307

<http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/DS1307.pdf>

25. Hoja técnica de la memoria EEPROM 24LC1025

<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21941B.pdf>

26. Hoja técnica de LCD JHD204A

<http://www.datasheetarchive.com/pdf-datasheets/Datasheets-29/DSA-565974.html>

27. Hoja técnica de modulo serial uMMC

<http://www.roguerobotics.com/wikidocs/ummc/documentation/printable>

<http://www.roguerobotics.com/files/ummc/documentation/ummc-100-a3-103.pdf>

28. Hoja técnica de módulos Xbee pro 868

http://www.digi.com/pdf/ds_xbeepro868.pdf

29. Hoja técnica Fuente ATX 12V

http://www.formfactors.org/developer/specs/ATX12V_PSDG_2_2_public_br2.pdf

30. Hoja técnica de conductivímetro Hachension 7

<http://www.hach.com/fmmimghach?/CODE%3A5450018510|1>

31. http://www.cienciapopular.com/n/Astronomia/EI_Sol/EI_Sol.php

32. <http://www.galeon.com/casanchi/ast/sol2.htm>
33. http://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_Solar
34. http://es.wikipedia.org/wiki/Radiaci%C3%B3n_solar
35. http://www.solarpedia.es/index.php/Radiaci%C3%B3n_solar
36. <http://www.monografias.com/trabajos65/radiacion-solar/radiacion-solar2.shtml>
37. <http://www.fepso.org.ec/Radicacion%20Solar%20en%20Cielo%20Nublado.pdf>
38. <http://es.wikipedia.org/wiki/Quito#Clima>
39. http://www.emaapq.gov.ec/1cal-agua/doc_calidad/calidad.pdf
40. <http://www.ulpgc.es/hege/almacen/download/29/29861/filtros.pdf>
41. http://download.siliconexpert.com/pdfs/2009/7/15/18/53/28/672/adi_/auto/adg508a_509a.pdf
42. Hoja técnica del termo higrómetro DM672
http://www.lsi-lastem.it/deposito/pdf/MW8007_Temp_RH.pdf
43. Hoja técnica del Radiómetro Global DPA153
http://www.lsi-lastem.it/WebDocument/INSTUM_00051_it.pdf
44. http://ocwus.us.es/arquitectura-e-ingenieria/operacionesbasicas/contenidos1/tema7/pagina_06.htm/images/pic010.jpg
45. http://www.telecable.es/personales/albatros1/calor/transferencia_de_calor_06_radiacion.htm
46. <http://www.epsea.org/solar-water-heater.html>
47. <http://www.pnuma.org/recnat/esp/documentos/cap5.pdf>
48. Hoja técnica del conductivímetro YSI 30

<http://www.ysi.com/media/pdfs/030136-YSI-Model-30-Operations-Manual-RevE.pdf>

49. Hoja técnica del termómetro Fluke 52 II

<http://www.isotest.es/web/Soporte/catalogos/fluke/FLUKETermometrossimple.pdf>

ANEXOS

ANEXO 1. Tabla de resultados obtenidos de Humedad H_A y H_1.....	17272
ANEXO 2. Tabla de resultados obtenidos de Radiación R_1.....	174
ANEXO 3. Tabla de resultados obtenidos de Conductividad	176
ANEXO 4. Tabla de resultados obtenidos de Medición de Flujo sensor FP7001A.....	177
ANEXO 5. Tabla de resultados de Medición de Flujo F_1	178
ANEXO 6. Tabla de resultados obtenidos de Medición de Flujo para sensor FP5600.	179
ANEXO 7. Tabla de resultados de Medición de Flujo F_2	180
ANEXO 8. Distribución y dimensiones del gabinete Metálico	182
ANEXO 9. Diagrama de conexiones del Gabinete Metálico	183
ANEXO 10. Diagrama P&ID de colector térmico solar para calentamiento de agua	184
ANEXO 11. Diagrama de bucle de ensayos de rendimiento de sistemas solares.....	185
ANEXO 12. Diagrama de bucle de ensayos de rendimiento de captadores solares....	186
ANEXO 13. Diagrama circuital total.....	187
ANEXO 14. Informe de ensayo de rendimiento para captadores solares	188
ANEXO 15. Informe de ensayo de rendimiento para sistemas solares.....	201

ANEXO 1. Tabla de resultados obtenidos de Humedad H_A y H_1

<i>Hora</i>	<i>Humedad Patrón [%RH]</i>	<i>Humedad ambiental H_A [%RH]</i>	<i>Humedad de la cámara H_1 [%RH]</i>	<i>Error Relativo H_A [%]</i>	<i>Error Relativo H_1 [%]</i>
17:31:00	61,8	60,9	59,5	1,5%	3,8%
17:32:00	62,1	61,0	59,7	1,8%	3,9%
17:33:00	62,2	61,3	60,1	1,4%	3,4%
17:34:00	62,4	61,5	59,9	1,5%	4,0%
17:35:00	62,6	61,7	60,1	1,5%	4,0%
17:36:00	62,7	61,9	60,3	1,3%	3,9%
17:38:00	62,8	62,2	60,7	0,9%	3,3%
17:39:00	62,9	62,1	60,5	1,2%	3,8%
17:40:00	63,0	62,2	60,7	1,2%	3,6%
17:41:00	63,1	62,4	60,5	1,1%	4,1%
17:43:00	63,2	62,7	60,9	0,7%	3,6%
17:44:00	63,3	62,6	60,9	1,1%	3,8%
17:45:00	63,4	62,8	61,1	1,0%	3,7%
17:46:00	63,6	63,0	60,9	1,0%	4,3%
17:47:00	63,8	63,1	61,4	1,1%	3,8%
17:49:00	63,9	63,5	61,6	0,6%	3,6%
17:50:00	64,0	63,5	61,8	0,8%	3,5%
17:51:00	64,1	63,6	61,6	0,8%	3,9%
17:52:00	64,3	63,7	61,8	0,9%	3,9%
17:53:00	64,4	63,8	61,8	0,9%	4,0%
17:54:00	64,5	63,9	62,0	1,0%	3,9%
17:55:00	64,6	64,1	62,0	0,8%	4,1%
18:02:00	64,9	64,5	62,2	0,6%	4,1%
18:03:00	65,2	64,5	62,4	1,1%	4,3%
18:05:00	65,4	65,0	62,8	0,5%	3,9%
18:06:00	65,6	65,0	63,0	0,8%	3,9%
18:08:00	65,7	65,3	63,2	0,5%	3,7%
18:09:00	65,9	65,4	63,2	0,7%	4,0%
18:13:00	66,0	65,7	63,6	0,5%	3,7%
18:14:00	66,1	65,7	63,4	0,6%	4,1%
18:19:00	66,2	65,7	63,2	0,7%	4,5%
18:20:00	66,4	65,8	63,6	0,9%	4,2%
18:24:00	66,6	66,1	63,8	0,8%	4,2%
18:29:00	66,8	66,8	64,4	0,0%	3,6%
18:30:00	66,9	66,7	64,2	0,3%	4,0%
18:42:00	67,0	66,7	64,2	0,5%	4,2%
18:43:00	67,2	66,8	64,2	0,5%	4,4%
18:48:00	67,3	67,2	64,6	0,1%	4,0%
18:49:00	67,4	67,2	65,1	0,3%	3,4%
18:50:00	67,5	67,2	64,9	0,4%	3,8%
19:02:00	67,6	67,6	64,9	0,0%	4,0%
19:03:00	67,8	67,6	65,1	0,3%	4,0%
19:22:00	67,9	67,8	65,3	0,2%	3,9%
19:23:00	68,0	68,0	65,5	0,0%	3,7%
19:24:00	68,1	67,9	65,3	0,2%	4,1%
19:58:00	68,2	68,3	65,5	0,2%	3,9%
19:59:00	68,4	68,2	65,5	0,3%	4,2%
20:25:00	68,6	68,4	65,7	0,3%	4,3%
20:30:00	68,7	68,6	65,9	0,2%	4,1%
20:35:00	68,9	68,9	66,1	0,0%	4,1%
20:45:00	69,0	68,9	65,9	0,2%	4,5%

20:50:00	69,3	69,2	66,1	0,1%	4,5%
20:55:00	69,4	69,2	66,1	0,2%	4,7%
22:35:00	69,7	69,5	66,7	0,2%	4,3%
22:40:00	69,8	69,8	67,1	0,0%	3,9%
22:45:00	70,0	69,9	66,5	0,1%	5,0%
23:20:00	70,1	70,1	67,1	0,0%	4,3%
23:25:00	70,2	70,3	66,9	0,2%	4,7%
23:55:00	70,4	70,4	67,1	0,0%	4,7%
0:00:00	70,5	70,6	67,5	0,2%	4,2%
0:25:00	70,6	70,7	67,3	0,2%	4,6%
0:30:00	70,7	70,7	67,5	0,0%	4,5%
0:35:00	70,8	70,8	67,7	0,0%	4,4%
0:40:00	70,9	70,9	67,7	0,1%	4,5%
0:50:00	71,0	71,0	67,5	0,0%	5,0%
0:55:00	71,1	71,1	67,7	0,1%	4,7%
1:00:00	71,2	71,3	67,9	0,1%	4,6%
1:05:00	71,3	71,3	67,9	0,0%	4,7%
2:00:00	71,1	71,2	68,1	0,2%	4,2%
2:05:00	71,0	71,1	67,9	0,1%	4,4%
2:20:00	70,9	70,9	67,3	0,0%	5,0%
2:25:00	70,8	70,8	67,5	0,0%	4,7%
3:05:00	70,6	70,7	67,3	0,2%	4,7%
3:10:00	70,6	70,6	67,1	0,0%	4,9%
3:30:00	70,4	70,4	67,1	0,0%	4,6%
3:35:00	70,5	70,5	66,9	0,1%	5,2%
3:40:00	70,7	70,6	66,9	0,2%	5,4%
3:45:00	70,8	70,8	67,3	0,0%	4,9%
3:50:00	71,0	70,8	67,7	0,3%	4,6%
3:55:00	71,1	71,0	67,5	0,1%	5,1%
4:00:00	71,2	71,1	67,7	0,1%	4,9%
4:15:00	71,4	71,3	67,7	0,1%	5,1%
4:20:00	71,5	71,5	67,9	0,0%	5,0%
4:35:00	71,6	71,6	67,7	0,1%	5,4%
4:55:00	71,8	71,8	68,3	0,1%	4,8%
5:15:00	71,9	71,9	68,1	0,0%	5,3%
5:20:00	72,0	72,0	68,1	0,0%	5,4%

	<i>Error Relativo H_A [%]</i>	<i>Error Relativo H₁ [%]</i>
Máximo	1,8%	5,4%
Minino	0,0%	2,8%
Promedio	0,3%	4,2%

ANEXO 2. Tabla de resultados obtenidos de Radiación R_1

<i>Fecha</i>	<i>Hora</i>	<i>Radiación media R_1 [W/m²]</i>	<i>Radiación máxima R_1 [W/m²]</i>	<i>Radiación Patrón Media [W/m²]</i>	<i>Radiación Patrón Máxima [W/m²]</i>	<i>Error Relativo Medio R_1 [%]</i>	<i>Error Relativo Máximo R_1 [%]</i>
14/04/2011	9:30:01	835,8	837,4	849,4	851,9	2%	2%
14/04/2011	9:31:01	834,2	837,4	851,3	855,8	2%	2%
14/04/2011	9:32:01	829,3	834,2	844,9	853,6	2%	2%
14/04/2011	9:33:01	829,3	830,9	850,0	853,7	2%	3%
14/04/2011	9:34:01	821,2	829,3	861,2	872,6	5%	5%
14/04/2011	9:35:01	817,9	821,2	870,7	878,4	6%	7%
14/04/2011	9:36:01	822,8	824,4	863,6	872,6	5%	6%
14/04/2011	9:37:01	827,7	829,3	878,9	882,7	6%	6%
14/04/2011	9:38:01	832,6	834,2	868,4	880,3	4%	5%
14/04/2011	9:39:01	832,6	834,2	862,7	872,7	3%	4%
14/04/2011	9:40:01	837,4	839,1	888,4	893,7	6%	6%
14/04/2011	9:41:01	845,6	847,2	885,8	889,7	5%	5%
14/04/2011	9:42:01	850,4	852,1	889,2	898,9	4%	5%
14/04/2011	9:43:01	857,0	858,6	900,0	906,8	5%	5%
14/04/2011	9:44:01	858,6	860,2	927,6	933,5	7%	8%
14/04/2011	9:45:01	863,5	865,1	927,9	929,9	7%	7%
14/04/2011	9:46:01	871,6	873,2	941,0	947,9	7%	8%
14/04/2011	9:47:01	886,2	887,8	939,4	947,6	6%	6%
14/04/2011	9:48:01	897,6	899,2	935,5	937,7	4%	4%
14/04/2011	9:49:01	907,4	910,6	942,2	947,8	4%	4%
14/04/2011	9:50:01	910,6	912,2	946,8	949,3	4%	4%
14/04/2011	9:51:01	913,9	915,5	935,2	941,5	2%	3%
14/04/2011	9:52:01	915,5	917,1	933,7	936,3	2%	2%
14/04/2011	9:53:01	915,5	918,7	925,7	931,6	1%	1%
14/04/2011	9:54:01	913,9	917,1	932,0	940,2	2%	2%
14/04/2011	9:55:01	910,6	915,5	939,5	959,3	3%	5%
14/04/2011	9:56:01	902,5	910,6	971,8	975,3	7%	7%
14/04/2011	9:57:01	900,9	902,5	970,0	975,4	7%	7%
14/04/2011	9:58:01	905,7	907,4	959,8	962,3	6%	6%
14/04/2011	9:59:01	910,6	912,2	963,4	970,6	5%	6%
14/04/2011	10:00:01	918,7	922,0	976,4	981,4	6%	6%
14/04/2011	10:01:01	930,1	931,8	971,7	973,8	4%	4%
14/04/2011	10:02:01	935,0	938,3	961,4	967,1	3%	3%
14/04/2011	10:03:01	939,9	941,5	955,6	959,7	2%	2%
14/04/2011	10:04:01	941,5	944,8	949,8	953,5	1%	1%
14/04/2011	10:05:01	933,4	939,9	948,8	952,2	2%	1%
14/04/2011	10:06:01	925,2	933,4	942,1	948,5	2%	2%
14/04/2011	10:07:01	918,7	926,9	948,3	958,6	3%	3%
14/04/2011	10:08:01	922,0	925,2	963,4	965,9	4%	4%
14/04/2011	10:09:01	918,7	926,9	960,8	963,9	4%	4%
14/04/2011	10:10:01	931,8	935,0	968,4	971,6	4%	4%
14/04/2011	10:11:01	938,3	943,1	975,9	982,3	4%	4%
14/04/2011	10:12:01	948,0	949,6	1000,7	1007,0	5%	6%
14/04/2011	10:13:01	956,1	957,8	995,8	1000,9	4%	4%
14/04/2011	10:14:01	956,1	959,4	986,9	989,7	3%	3%
14/04/2011	10:15:01	957,8	959,4	980,2	985,6	2%	3%
14/04/2011	10:16:01	944,8	957,8	866,7	972,5	9%	2%
14/04/2011	10:24:01	943,1	995,2	998,8	1000,4	6%	1%
14/04/2011	10:25:01	954,5	985,4	1000,9	1002,5	5%	2%
14/04/2011	10:26:01	956,1	957,8	1006,1	1011,5	5%	5%
14/04/2011	10:27:01	957,8	959,4	1012,4	1018,3	5%	6%
14/04/2011	10:28:01	970,8	972,4	1022,4	1023,7	5%	5%
14/04/2011	10:29:01	978,9	982,2	1021,9	1023,0	4%	4%
14/04/2011	10:30:01	987,0	988,7	1024,1	1037,1	4%	5%

14/04/2011	10:31:01	993,5	995,2	1044,5	1050,9	5%	5%
14/04/2011	10:32:01	1003,3	1004,9	1057,1	1062,5	5%	5%
14/04/2011	10:33:01	1014,7	1016,3	1035,4	1046,5	2%	3%
14/04/2011	10:34:01	1032,6	1034,2	1040,6	1055,0	1%	2%
14/04/2011	10:35:01	1039,1	1040,7	1063,6	1071,6	2%	3%
14/04/2011	10:36:01	1014,7	1037,4	1068,1	1076,6	5%	4%
14/04/2011	10:37:01	1016,3	1019,6	1060,8	1072,2	4%	5%
14/04/2011	10:38:01	1009,8	1016,3	1032,5	1046,3	2%	3%
14/04/2011	10:39:01	1014,7	1016,3	1015,0	1019,5	0%	0%
14/04/2011	10:40:01	1009,8	1016,3	1020,3	1023,5	1%	1%
14/04/2011	10:41:01	996,8	1004,9	1015,5	1020,9	2%	2%
14/04/2011	10:42:01	993,5	996,8	1031,6	1036,1	4%	4%
14/04/2011	10:43:01	995,2	996,8	1054,6	1067,1	6%	7%
14/04/2011	10:44:01	996,8	998,4	1025,7	1052,3	3%	5%
14/04/2011	10:45:01	1009,8	1011,4	1043,3	1056,0	3%	4%
14/04/2011	10:46:01	1016,3	1019,6	1066,3	1075,3	5%	5%
14/04/2011	10:47:01	987,0	1019,6	1083,9	1088,1	9%	6%
14/04/2011	10:48:01	1022,8	1024,4	1095,0	1101,4	7%	7%
14/04/2011	10:49:01	1029,3	1030,9	1114,6	1126,1	8%	8%
14/04/2011	10:50:01	1052,1	1055,3	1136,5	1140,1	7%	7%
14/04/2011	10:51:01	1066,7	1068,3	1151,8	1157,8	7%	8%
14/04/2011	10:52:01	1089,5	1091,1	1135,2	1146,8	4%	5%
14/04/2011	10:53:01	1096,0	1099,2	1120,8	1125,7	2%	2%
14/04/2011	10:54:01	1091,1	1094,4	1115,6	1121,9	2%	2%
14/04/2011	10:55:01	1074,8	1087,9	1125,7	1135,1	5%	4%
14/04/2011	10:56:01	1071,6	1074,8	1139,3	1143,1	6%	6%
14/04/2011	10:57:01	1083,0	1084,6	1135,2	1140,2	5%	5%
14/04/2011	10:58:01	1086,2	1094,4	1131,9	1148,2	4%	5%
14/04/2011	10:59:01	1102,5	1105,7	1165,4	1173,1	5%	6%
14/04/2011	11:00:01	1086,2	1100,9	1149,4	1157,6	5%	5%
14/04/2011	11:01:01	1091,1	1092,7	1150,4	1178,1	5%	7%
14/04/2011	11:02:01	1096,0	1104,1	1158,0	1177,1	5%	6%
14/04/2011	11:03:01	1097,6	1109,0	1133,0	1145,8	3%	3%
14/04/2011	11:04:01	1071,6	1104,1	1131,8	1145,2	5%	4%
14/04/2011	11:05:01	1099,2	1113,9	1118,8	1142,8	2%	3%
14/04/2011	11:06:01	1081,4	1102,5	1085,3	1092,1	0%	1%
14/04/2011	11:07:01	1052,1	1078,1	1085,2	1100,0	3%	2%
14/04/2011	11:08:01	1039,1	1055,3	1096,9	1101,3	5%	4%
14/04/2011	11:09:01	1024,4	1039,1	1087,9	1089,9	6%	5%
14/04/2011	11:10:01	1017,9	1026,1	1092,0	1098,2	7%	7%
14/04/2011	11:11:01	1029,3	1030,9	1077,6	1083,0	4%	5%
14/04/2011	11:12:01	1029,3	1030,9	1065,2	1072,2	3%	4%
14/04/2011	11:13:01	1030,9	1034,2	1073,9	1092,0	4%	5%
14/04/2011	11:14:01	1037,4	1039,1	1104,9	1121,7	6%	7%
14/04/2011	11:15:01	1032,6	1037,4	1128,8	1132,7	9%	8%
14/04/2011	11:16:01	1042,3	1045,6	1136,4	1143,9	8%	9%
14/04/2011	11:17:01	1061,8	1063,5	1145,2	1149,5	7%	7%
14/04/2011	11:18:01	1074,8	1076,5	1131,2	1142,0	5%	6%
14/04/2011	11:19:01	1074,8	1078,1	1116,9	1121,7	4%	4%
14/04/2011	11:20:01	1078,1	1079,7	1145,5	1171,6	6%	8%
14/04/2011	11:21:01	1076,5	1079,7	1114,8	1179,6	3%	8%
14/04/2011	11:22:01	1071,6	1079,7	1133,0	1170,0	5%	8%
14/04/2011	11:23:01	890,0	1084,6	845,0	1110,0	5%	2%
14/04/2011	12:17:01	820,0	1281,4	799,3	1235,4	3%	4%
14/04/2011	12:18:01	800,0	1292,7	846,6	1258,1	5%	3%
14/04/2011	12:19:01	429,3	480,0	427,7	477,5	0%	1%
14/04/2011	12:20:01	585,8	953,7	596,8	1049,7	2%	9%

	Error Medio	Error Máximo
Máximo	9%	9%
Promedio	4%	5%

ANEXO 3. Tabla de resultados obtenidos de Conductividad

N°	Conductividad	Conductividad Patrón	Error Relativo
1	22,1	20,7	7%
2	35,3	33,2	7%
3	44,0	42,0	5%
4	53,1	50,8	4%
5	64,0	61,5	4%
6	74,0	72,4	2%
7	84,8	84,6	0%
8	97,5	94,5	3%
9	107,5	104,4	3%
10	115,2	114,9	0%
11	130,8	129,0	1%
12	144,4	141,8	2%
13	158,1	157,1	1%
14	168,3	170,3	1%
15	180,8	181,6	0%
16	192,9	193,3	0%
17	201,4	203,5	1%
18	211,4	210,0	1%
19	216,2	220,0	2%
20	224,9	226,5	1%
21	240,0	241,5	1%
22	251,5	264,0	5%
23	269,0	276,0	3%
24	274,0	284,0	4%
25	293,0	297,0	1%
26	311,4	302,0	3%
27	314,6	304,0	3%
28	311,4	307,0	1%
29	311,4	309,0	1%
30	317,9	311,0	2%
31	321,3	313,0	3%
32	324,8	316,0	3%
33	324,8	319,0	2%
34	328,3	322,0	2%
35	331,9	325,0	2%
36	335,6	328,0	2%
37	339,4	331,0	3%
38	343,2	334,0	3%
39	343,2	337,0	2%
40	347,1	339,0	2%
41	347,1	341,0	2%
42	351,1	344,0	2%
43	355,2	348,0	2%
44	359,4	352,0	2%
45	359,4	356,0	1%
46	368,0	359,0	3%
47	372,5	363,0	3%
48	372,5	369,0	1%
49	381,7	373,0	2%
50	386,5	377,0	3%
51	396,4	383,0	4%
52	401,6	388,0	4%
53	406,9	394,0	3%
54	412,3	400,0	3%
Error Máximo			7%
Error Promedio			2%

ANEXO 4. Tabla de resultados obtenidos de Medición de Flujo para sensor FP7001A

Nº	Masa [g]	Tiempo [s]	Volumen [lt]	Flujo [kg/s]
1	2670	5,66	2,67	0,472
2	2740	5,72	2,74	0,479
3	2956	5,91	2,96	0,500
4	3146	6,25	3,15	0,503
5	2515	4,97	2,52	0,506
6	2559	5,28	2,56	0,485
7	2283	4,78	2,28	0,478
8	2570	5,22	2,57	0,492
9	2600	5,37	2,60	0,484
10	2200	4,47	2,20	0,492
11	2410	4,87	2,41	0,495
12	2390	4,87	2,39	0,491
13	2375	4,82	2,38	0,493
14	2770	5,82	2,77	0,476
15	2276	4,75	2,28	0,479
16	2240	4,53	2,24	0,494
17	2430	4,97	2,43	0,489
18	2850	5,59	2,85	0,510
19	2694	5,53	2,69	0,487
20	2980	6,09	2,98	0,489
21	2814	5,82	2,81	0,484
22	2915	5,97	2,92	0,488
23	2710	5,59	2,71	0,485
24	2590	5,41	2,59	0,479
25	2765	5,68	2,77	0,487

Promedio	0,489
Desviación	0,009
Error	0.017
Error relativo	1,3%

ANEXO 5. Tabla de resultados de Medición de Flujo F_1

Nº	Frecuencia [Hz]	Factor k	Flujo medido [kg/s]
1	9,9	0,049	0,471
2	10,5	0,047	0,499
3	9,7	0,050	0,461
4	10,2	0,048	0,485
5	10,7	0,046	0,509
6	10,9	0,045	0,518
7	10,3	0,047	0,490
8	10,3	0,047	0,490
9	10,3	0,047	0,490
10	10,3	0,047	0,490
11	10,5	0,047	0,499
12	10,4	0,047	0,494
13	10,8	0,045	0,513
14	11,1	0,044	0,528
15	10,0	0,049	0,475
16	10,6	0,046	0,504
17	10,1	0,048	0,480
18	9,8	0,050	0,466
19	10,9	0,045	0,518
20	10,5	0,047	0,499
21	10,4	0,047	0,494
22	10,6	0,046	0,504
23	10,6	0,046	0,504
24	10,2	0,048	0,485
25	10,5	0,047	0,499
26	10,0	0,049	0,475
27	10,7	0,046	0,509
28	10,2	0,048	0,485
29	10,1	0,048	0,480
30	10,0	0,049	0,475
31	10,5	0,047	0,499
32	10,3	0,047	0,490
33	10,0	0,049	0,475
34	10,4	0,047	0,494
35	9,9	0,049	0,471
36	10,0	0,049	0,475
37	10,9	0,045	0,518
38	10,2	0,048	0,485
39	10,3	0,047	0,490
40	10,1	0,048	0,480
41	9,5	0,051	0,452
42	10,3	0,047	0,490
43	10,0	0,049	0,475
44	10,1	0,048	0,480
45	9,9	0,049	0,471
46	10,2	0,048	0,485
47	9,9	0,049	0,471

Promedio	0,048	0,489
Desviación	0,002	0,016
Error Relativo	0,0011	0,011
Error	2%	2%

ANEXO 6. Tabla de resultados obtenidos de Medición de Flujo para sensor FP5600

Nº	Masa [g]	Tiempo [s]	Volumen [lt]	Flujo [kg/s]
1	2690	11,44	2,69	0,235
2	3035	12,50	3,035	0,243
3	3108	12,85	3,108	0,242
4	2880	12,00	2,88	0,240
5	3063	12,82	3,063	0,239
6	2969	12,13	2,969	0,245
7	2955	12,16	2,955	0,243
8	2970	12,25	2,97	0,242
9	2856	12,03	2,856	0,237
10	3078	12,50	3,078	0,246
11	2689	11,06	2,689	0,243
12	2923	12,13	2,923	0,241
13	2807	12,09	2,807	0,232
14	2924	12,35	2,924	0,237
15	2843	11,97	2,843	0,238
16	3088	13,28	3,088	0,233
17	2963	12,41	2,963	0,239
18	3096	13,09	3,096	0,237
19	2962	12,53	2,962	0,236
20	2990	12,59	2,99	0,237
21	2970	12,47	2,97	0,238
22	2925	12,53	2,925	0,233
23	2913	12,22	2,913	0,238
24	3248	13,87	3,248	0,234
25	3030	12,56	3,03	0,241
26	3345	14,13	3,345	0,237

Promedio	0,239
Desviación	0,004
Error	0,002
Error Relativo	1%

ANEXO 7. Tabla de resultados de Medición de Flujo F₂

Nº	Frecuencia [Hz]	Factor k	Flujo medido [kg/s]
1	65,1	0,004	0,248
2	70,0	0,003	0,267
3	70,1	0,003	0,267
4	62,8	0,004	0,239
5	57,3	0,004	0,219
6	69,9	0,003	0,266
7	57,7	0,004	0,220
8	59,3	0,004	0,226
9	65,6	0,004	0,250
10	60,9	0,004	0,232
11	66,3	0,004	0,253
12	59,6	0,004	0,227
13	57,1	0,004	0,218
14	61,5	0,004	0,234
15	60,8	0,004	0,232
16	64,2	0,004	0,245
17	65,2	0,004	0,249
18	62,5	0,004	0,238
19	63,9	0,004	0,244
20	68,3	0,003	0,260
21	63,1	0,004	0,241
22	63,4	0,004	0,242
23	67,9	0,004	0,259
24	71,0	0,003	0,271
25	66,8	0,004	0,255
26	69,2	0,003	0,264
27	63,8	0,004	0,243
28	60,4	0,004	0,230
29	58,0	0,004	0,221
30	66,3	0,004	0,253
31	69,5	0,003	0,265
32	64,0	0,004	0,244
33	56,9	0,004	0,217
34	61,1	0,004	0,233
35	58,4	0,004	0,223
36	57,7	0,004	0,220
37	58,7	0,004	0,224
38	68,6	0,003	0,261
39	58,1	0,004	0,221
40	71,3	0,003	0,272
41	63,4	0,004	0,242
42	63,7	0,004	0,243
43	52,3	0,005	0,199
44	60,5	0,004	0,231
45	62,1	0,004	0,237
46	63,4	0,004	0,242
47	62,1	0,004	0,237
48	65,4	0,004	0,249
49	64,7	0,004	0,247
50	60,1	0,004	0,229
51	63,4	0,004	0,242
52	66,7	0,004	0,254
53	59,7	0,004	0,228

54	62,8	0,004	0,239
55	62,5	0,004	0,238
Nº	Frecuencia [Hz]	Factor k	Flujo medido [kg/s]
56	60,3	0,004	0,230
57	62,7	0,004	0,239
58	67,3	0,004	0,257
59	68,0	0,004	0,259
60	65,5	0,004	0,250
61	57,7	0,004	0,220
62	57,4	0,004	0,219
63	58,4	0,004	0,223
64	54,5	0,004	0,208
65	60,9	0,004	0,232
66	59,5	0,004	0,227
67	65,4	0,004	0,249
68	64,7	0,004	0,247

Promedio	0,004	0,240
Desviación	0,0003	0,016
Error	0,0002	0,011
Error Relativo	5%	4,5%

ANEXO 8. Distribución y dimensiones del gabinete Metálico

ANEXO 9. Diagrama de conexiones del Gabinete Metálico

ANEXO 10. Diagrama P&ID de colector térmico solar para calentamiento de agua

**ANEXO 11. Diagrama de bucle de ensayos de rendimiento
de sistemas solares termosifón**

ANEXO 12. Diagrama de bucle de ensayos de rendimiento de captadores solares planos

ANEXO 13. Diagrama circuital total

GLOSARIO DE TÉRMINOS

- **Radiación directa:** Es aquella que llega directamente del Sol sin haber sufrido cambio alguno en su dirección. Este tipo de radiación se caracteriza por proyectar una sombra definida de los objetos opacos que la interceptan.
- **Radiación difusa:** Parte de la radiación que atraviesa la atmósfera es reflejada por las nubes o absorbida por éstas. Esta radiación, que se denomina difusa, va en todas direcciones, como consecuencia de las reflexiones y absorciones, no sólo de las nubes sino de las partículas de polvo atmosférico, montañas, árboles, edificios, el propio suelo, etc. Este tipo de radiación se caracteriza por no producir sombra alguna respecto a los objetos opacos interpuestos. Las superficies horizontales son las que más radiación difusa reciben, ya que ven toda la bóveda celeste, mientras que las verticales reciben menos porque sólo ven la mitad.
- **Radiación reflejada:** La radiación reflejada es, como su nombre indica, aquella reflejada por la superficie terrestre. La cantidad de radiación depende del coeficiente de reflexión de la superficie, también llamado albedo. Las superficies horizontales no reciben ninguna radiación reflejada, porque no ven ninguna superficie terrestre y las superficies verticales son las que más radiación reflejada reciben.
- **Radiación global:** Es la radiación total. Es la suma de las tres radiaciones. En un día despejado, con cielo limpio, la radiación directa es preponderante sobre la radiación difusa. Por el contrario, en un día nublado no existe radiación directa y la totalidad de la radiación que incide es difusa.
- **Irradiancia:** Es la magnitud que mide la radiación solar que llega a la Tierra, que mide la energía que, por unidad de tiempo y área, alcanza a la Tierra. Su unidad es el W/m^2 .
- **Constante Solar:** La constante solar es la cantidad de energía recibida en forma de radiación solar por unidad de tiempo y unidad de superficie,

medida en la parte externa de la atmósfera terrestre en un plano perpendicular a los rayos del Sol. Los resultados de su medición por satélites arrojan un valor promedio de $1,366 \times 10^6 \text{ erg/cm}^2 \text{ s}$, o $1366 \text{ [W/m}^2\text{]}$.

- **Calor:** El calor es la transferencia de energía de un cuerpo de mayor temperatura a otro de menor temperatura. La cantidad de calor es una manifestación de la energía interna de un cuerpo. A escala microscópica las moléculas que constituyen la materia tienen una energía cinética proveniente del movimiento aleatorio de las moléculas y una energía potencial proveniente de una fuerza de atracción entre sí. De allí que la energía interna de un cuerpo es la suma de estas dos energías.
- **Temperatura:** La temperatura es la medida directa de la energía cinética de un cuerpo. Al calentar un cuerpo se provoca un incremento de la energía cinética interna lo que se evidencia por un aumento de su temperatura. Si la temperatura de dos cuerpos es la misma, su energía cinética es igual, pero no significa que su energía interna sea igual.
- **Calor específico:** El calor específico es la cantidad de calor por una unidad de masa necesaria para elevar en un grado centígrado la temperatura de un cuerpo.
- **Primera Ley de la Termodinámica:** Es la transformación de la energía interna de un cuerpo mediante el incremento de trabajo introducido y el incremento de temperatura que en sí es la ley de conservación de la energía aplicada a un proceso de calor.
- **Segunda Ley de la Termodinámica:** La segunda ley establece un límite a la eficiencia de un proceso de calor y fija la dirección en que se puede llevar la transferencia de calor.
- **Conductividad y resistividad:** La conductividad eléctrica es la medida de la capacidad del agua para conducir electricidad. Es indicativo de la materia ionizable total presente en el agua. Las sales disueltas son las que permiten al agua conducir electricidad. El agua pura contribuye

mínimamente a la conductividad, la cantidad desales solubles en agua se mide por la electro-conductividad (EC), la resistividad es la medida recíproca de la conductividad. La unidad estándar de resistencia eléctrica es el ohm y la resistividad de las aguas, se expresa en megaohmios por centímetro, la conductividad se expresa en el valor recíproco, normalmente como microsiemens por centímetro. Para el agua ultra pura los valores respectivos son de $18.24 \text{ M}\Omega/\text{cm}$ y $0.05483 \mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C (47).