	GESTIÓN DE SERVICIOS ACADÉMICOS Y BIBLIOTECARIOS		CÓDIGO	FO-GS-15	
			VERSIÓN	02	
	ESQUEMA HOJA DE RESUMEN			FECHA	03/04/2017
				PÁGINA	1 de 150
ELABORÓ		REVISÓ		APROBÓ	
Jefe División de Biblioteca		Equipo Operativo de Calidad		Líder de Calidad	

RESUMEN TRABAJO DE GRADO

AUTOR(ES): NOMBRES Y APELLIDOS COMPLETOS

NOMBRE(S): NUMAEL APELLIDOS: LIMAS RODRÍGUEZ.

NOMBRE(S): EDWIN LEONARDO APELLIDOS: PÉREZ BUITRAGO.

FACULTAD: INGENIERÍA.

PLAN DE ESTUDIOS: INGENIERÍA ELECTRÓNICA.

DIRECTOR:

NOMBRE(S): FRANCISCO ERNESTO APELLIDOS: MORENO GARCÍA.

TÍTULO DEL TRABAJO (TESIS): DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA UNA BOMBA DE CALOR CON ASISTENCIA SOLAR.

En este documento se presenta el desarrollo e implementación de un sistema de control de temperatura difuso en una placa de desarrollo Arduino Mega 2560, el controlador logró el calentamiento de agua por medio de un colector solar plano con asistencia de una bomba de calor. Se realizó un estudio teórico de la planta para encontrar como se realiza la transferencia de calor al agua y que variables son claves en el proceso, se realizó una instrumentación de temperatura, presión y radiación, parámetros claves, además, desde una interfaz de usuario desarrollada en el lenguaje de programación Python, donde se visualiza la información en tiempo real en la planta, se aprecian las gráficas donde se analizan la variación de datos, se manipulan los actuadores desde un modo manual para realizar pruebas en el módulo hasta un punto de temperatura máxima posible. Se diseñó y simuló en Matlab una estrategia de control, que funciona desde el modo automático en la interfaz, donde se solicita una temperatura deseada dentro del rango de trabajo del sistema. Se realizaron pruebas de funcionamiento en el mes de noviembre del año 2019, dentro del campus de la Universidad Francisco de Paula Santander de la ciudad de Cúcuta, Colombia.

PALABRAS CLAVES: Temperatura; Controlador difuso; Bomba de calor; Arduino; Python

CARACTERÍSTICAS:

PÁGINAS: 151 PLANOS: 0 ILUSTRACIONES: 97 CD ROOM:

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA UNA
BOMBA DE CALOR CON ASISTENCIA SOLAR

NUMAEL LIMAS RODRIGUEZ
EDWIN LEONARDO PEREZ BUITRAGO

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA
PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
SAN JOSÉ DE CÚCUTA

2020

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA UNA
BOMBA DE CALOR CON ASISTENCIA SOLAR

NUMAEL LIMAS RODRIGUEZ
EDWIN LEONARDO PEREZ BUITRAGO

Tesis de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Electrónico

Director:

Dr. IE. Francisco Ernesto Moreno García

Modalidad

TESIS DE GRADO

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍA

PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

SAN JOSÉ DE CÚCUTA

2020



**CARTA DE AUTORIZACIÓN DE LOS AUTORES PARA
LA CONSULTA, LA REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL Y LA PUBLICACIÓN
ELECTRÓNICA DEL TEXTO COMPLETO**

Cúcuta,

Señores

BIBLIOTECA EDUARDO COTE LAMUS

Ciudad

Cordial saludo:

Numael Limas Rodríguez, identificado con la C.C. N° 1'090.449.949 de Cúcuta y Edwin Leonardo Pérez Buitrago, identificado con la C.C. N° 1'090.176.295 de Chinácota, autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado titulado Diseño E Implementación De Un Sistema De Control Para Una Bomba De Calor Con Asistencia Solar presentado y aprobado en el año 2020 como requisito para optar al título de Ingeniero Electrónico; autorizo(amos) a la biblioteca de la Universidad Francisco de Paula Santander, Eduardo Cote Lamus, para que con fines académicos, muestre a la comunidad en general a la producción intelectual de esta institución educativa, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo de grado en la página web de la Biblioteca Eduardo Cote Lamus y en las redes de información del país y el exterior, con las cuales tenga convenio la Universidad Francisco de Paula Santander.
- Permita la consulta, la reproducción, a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato CD-ROM o digital desde Internet, Intranet etc.; y en general para cualquier formato conocido o por conocer.

Lo anterior, de conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la ley 1982 y el artículo 11 de la decisión andina 351 de 1993, que establece que **"los derechos morales del trabajo son propiedad de los autores"**, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

Numael Limas Rodríguez
1'090.449.949 de Cúcuta

Edwin Leonardo Pérez B.
1'090.176.295 de Chinácota

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE UN TRABAJO DE GRADO

Fecha: CÚCUTA, 27 DE NOVIEMBRE DE 2020
Hora: 09:00
Lugar: MODALIDAD REMOTA SINCRÓNICO
Plan de Estudios: INGENIERÍA ELECTRÓNICA
Título de la Tesis: "DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA UNA BOMBA DE CALOR CON ASISTENCIA SOLAR"
Jurados: IE, MSc KARLA CECILIA PUERTO LÓPEZ
IE, MSc ORIANA ALEXANDRA LÓPEZ BUSTAMANTE
Director: IE, PhD FRANCISCO ERNESTO MORENO GARCÍA

Nombre del Estudiante	Código	Calificación
NUMAEL LIMAS RODRÍGUEZ	1161395	CINCO, CERO (5,0)

LAUREADA



KARLA CECILIA PUERTO LÓPEZ



ORIANA ALEXANDRA LÓPEZ BUSTAMANTE



DINAEL GUEVARA IBARRA
Coordinador Comité Curricular
Ingeniería Electrónica

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE UN TRABAJO DE GRADO

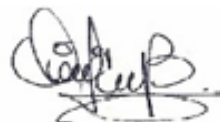
Fecha: CÚCUTA, 27 DE NOVIEMBRE DE 2020
Hora: 09:00
Lugar: MODALIDAD REMOTA SINCRÓNICO
Plan de Estudios: INGENIERÍA ELECTRÓNICA
Título de la Tesis: "DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA UNA BOMBA DE CALOR CON ASISTENCIA SOLAR"
Jurados: IE, MSc KARLA CECILIA PUERTO LÓPEZ
IE, MSc ORIANA ALEXANDRA LÓPEZ BUSTAMANTE
Director: IE, PhD FRANCISCO ERNESTO MORENO GARCÍA

Nombre del Estudiante	Código	Calificación
EDWIN LEONARDO PÉREZ BUITRAGO	1160382	CINCO, CERO (5,0)

LAUREADA



KARLA CECILIA PUERTO LOPEZ



ORIANA ALEXANDRA LOPEZ BUSTAMANTE



DINAELE GUEVARA IBARRA
Coordinador Comité Curricular
Ingeniería Electrónica

Dedicatoria

Quiero dedicar esta tesis a Dios, por permitirme alcanzar este momento tan especial, donde he aprendido a nunca rendirme, aprendiendo a valorar y aprender de todo lo que traiga la vida en su camino. A mis padres y mi hermana por creer siempre en mis capacidades, brindando su apoyo, consejos y comprensión, ustedes son la fuente de motivación e inspiración para superarme cada día. A toda mi familia que son lo más valioso que tengo, gracias por el apoyo que me brindaron en el transcurso de mi carrera universitaria.

Numael Limas Rodríguez

De manera especial quiero dedicar esta tesis a mis padres José Pérez e Isabel Buitrago quienes incondicionalmente me han brindaron su apoyo en el transcurso de mi vida para lograr mis metas, también quiero dedicarle a mi hermano Edwar Perez este triunfo quien en muchos momentos estuvo allí para tenderme una mano cuando lo necesitaba, a los familiares que creyeron en mí y a aquellos amigos que de muchas maneras me ayudaron y me aconsejaron, a mis compañeros de carrera con quienes compartí momentos inolvidables.

Edwin Leonardo Pérez Buitrago

Agradecimientos

Agradezco a la Universidad Francisco de Paula Santander por haberme aceptado y abrirme las puertas de la educación universitaria, así como a los diferentes docentes que compartieron sus conocimientos y su apoyo para seguir adelante. Agradezco a mi director de trabajo de grado, por haberme brindado esta oportunidad, así como guiarnos y asesorarnos para hacer posible este proyecto. A Edwin, por acompañarme durante todo este arduo proceso, compartiendo alegrías y fracasos. A mis compañeros, con los que he compartido grandes momentos, gracias por su buena onda y motivación. Finalmente, gracias a todas las personas que me ayudaron de una u otra manera durante mi aprendizaje, por la comprensión o el ánimo en los momentos en que los necesite.

Numael Limas Rodríguez

Con muchísima alegría le doy gracias a Dios por concederme esta felicidad al haber terminado mi carrera, donde solo él sabe todo el esfuerzo y empeño que puse para lograrlo, también le agradezco por bendecirme con una familia amorosa y comprensiva, por darme unos padres y un hermano a quienes les debo una venia por creer y confiar en mí, por su apoyo y por darme la oportunidad de ser alguien en la vida. Agradezco a mi novia Vanessa Cárdenas y su familia todo el apoyo incondicional que recibí en esta etapa final de mi carrera. Agradezco a todos los profesores de la UFPS no solo por enseñarme a ser un profesional competente sino también a ser una gran persona, en especial al Ingeniero Francisco Moreno por permitir que yo fuese uno de sus tesis y de quien aprendí mucho. Agradezco a Numael por confiar y compartir conmigo este reto que con mucho esfuerzo logramos terminar.

Edwin Leonardo Pérez Buitrago

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
Introducción	20
1. Planteamiento del problema	23
1.1. Título	23
1.2. Descripción del problema	23
1.2.1. Formulación del problema.	24
2. Justificación	25
2.1. Impacto hecho	25
2.2. Beneficios tecnológicos	25
2.3. Beneficios económicos	27
2.4. Beneficios Sociales	27
2.5. Beneficios institucionales y empresariales	28
3. Alcances	29
3.1. Tipo de proyecto	29
3.2. Resultados esperados	29
3.2.1. Resultados Directos.	30
3.2.2. Resultados Indirectos.	30
4. Limitaciones y delimitaciones	31
4.1. Limitaciones	31
4.2. Delimitaciones	31
5. Objetivos	33
5.1. Objetivo general	33

5.2. Objetivos específicos	33
6. Marco referencial	35
6.1. Antecedentes	35
6.2. Marco teórico	41
6.2.1. Electroválvula TCN-02T de TCrystal.	41
6.2.2. Sensor de temperatura Pt 100.	41
6.2.3. Caudalímetro YF-S201.	42
6.2.4. Medidor de radiación solar Davis 6450.	43
6.2.5. Medidor SM-206	44
6.2.6. Sensor de presión SPT25-10-0300 ^a .	44
6.2.7. Transistor BJT en modo corte-saturación	45
6.2.8. Relé	47
6.2.9. MAX31865	48
6.2.10. Optoacoplador	49
6.2.11. Amplificador seguidor de voltaje	50
6.2.12. Amplificador no inversor	51
6.2.13. Circuito divisor de voltaje	53
6.2.14. Arduino Mega 2560.	54
6.2.15. IDE Arduino	57
6.2.16. Lenguaje de programación Python.	58
6.2.17. Algoritmo de control-Fuzzy Logic (Lógica difusa).	58
6.2.18. Protocolo de comunicación SPI.	59
6.2.19. Comunicación serial	61

6.3. Marco legal	61
7. Diseño metodológico.	64
7.1. Metodología	64
8. Resultados	68
8.1. Conociendo la planta	68
8.2. Análisis teórico	71
8.2.1. Superficies de respuesta	75
8.3. Sensores, actuadores y acondicionamiento de señales	77
8.3.1. Conexión de las PT100	77
8.3.2. Conexión de sensor de presión	78
8.3.3. Conexión de sensor de radiación	79
8.3.4. Conexión de sensor de nivel	80
8.3.5. Conexión de la electroválvula	81
8.3.6. Conexión de sensor de flujo	82
8.3.7. Compresor	83
8.3.8. Construcción de shield para Arduino	83
8.4. Calibración de sensores	84
8.4.1. Caudalímetro YF-S201 y electroválvula TC02	84
8.4.2. Sensor de radiación DAVIS 6450	90
8.5. Programación	91
8.5.1. Arduino	91
8.5.2. Interfaz de usuario	93
8.6. Pruebas de funcionamiento de la planta	100

8.6.1.Pruebas en compresión y corrección de fugas en tubería de cobre	100
8.6.1.1.Primer prueba de funcionamiento de la planta con compresor On y bajo techo 5 de noviembre de 2019 17:50 horas	100
8.6.1.2.Corrección de fuga presente en la tubería	103
8.6.1.3.Prueba de presión en el sistema posterior a la corrección de fugas	103
8.6.1.4.Carga de refrigerante	104
8.6.1.5.Pruebas de funcionamiento sensor de flujo	107
8.7. Caracterización del sistema	108
8.7.1.Caracterización del sistema bajo sombra	108
8.7.2.Caracterización del sistema con radiación solar presente	114
8.8. Diseño e implementación de control fuzzy	116
8.8.1.Diseño del lazo de control	117
8.8.2.Sistema de inferencia difuso	119
8.8.3.Simulación de controlador en Matlab	125
8.9. Implementación del controlador	130
8.9.1.Pruebas experimentales con controlador	131
9.Divulgaciones	137
10.Conclusiones	142
Referencias bibliográficas	146

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Capacidad instalada de energía solar en Colombia (en MW) entre los años 2008 a 2017.	20
Figura 2. Comparación de la capacidad instalada de energía solar-térmica concentrada entre los años 2008-2014.	21
Figura 3. Modulo calentador de agua hibrido.	24
Figura 4. Electroválvula TCN-02.	41
Figura 5. Sensor Pt100 de dos hilos.	42
Figura 6. Sensor de flujo de líquido YF-S201.	43
Figura 7. Sensor de radiación Davis 6450.	43
Figura 8. Medidor de radiación SM-206.	44
Figura 9. Sensor de presión SPT25-10-0300A	45
Figura 10. Esquema de un transistor NPN para que funcione en corte-saturación.	46
Figura 11. Esquema de un transistor NPN para que funcione en corte-saturación	47
Figura 12. Esquema de interno de un relé.	47
Figura 13. Relé comúnmente usado en proyectos electrónicos.	48
Figura 14. Esquema de conexiones del módulo MAX31865.	49
Figura 15. Esquema interno del optoacoplador 4n25.	50
Figura 16. Esquema de un amplificador seguidor de voltaje en un integrado LM741.	51
Figura 17. Esquema de un amplificador no inversor en un integrado LM741.	52
Figura 18. Esquema de montaje de un divisor de voltaje.	53
Figura 19. Comparación de algunas tarjetas de desarrollo.	56

Figura 20. Arduino Mega 2560	57
Figura 21. Estructura de un controlador difuso.	59
Figura 22. Conexiones entre maestro y esclavos para hacer posible la comunicación SPI	60
Figura 23. Puntos de medición del sistema.	69
Figura 24. Diagrama de flujo	75
Figura 25. Superficie de respuesta del sistema con el compresor OFF.	75
Figura 26. Superficie de respuesta del sistema con el compresor ON.	76
Figura 27. Conexión de las MAX31865 para las PT100	77
Figura 28. Conexión del sensor de presión.	78
Figura 29. Conexión del sensor de radiación solar.	79
Figura 30. Conexión del sensor de nivel con circuito pull down.	80
Figura 31. Conexión para una salida de 0 a 10v DC.	81
Figura 32. Circuito de control de la electroválvula.	81
Figura 33. Conexión para sensor de flujo.	82
Figura 34. Conexiones para control de compresor desde Arduino.	83
Figura 35. Diseño definitivo de shield para instrumentación y acondicionamiento de sensores.	84
Figura 36. Gráficas en primera prueba de: a) sensor de flujo y b) electroválvula.	85
Figura 37. Gráfica de data usada para calibración del sensor de flujo YF201S.	88
Figura 38. Gráficas con ajuste de datos en prueba de: a) sensor de flujo y b) electroválvula.	90
Figura 39. Código de recepción de datos por puerto serie.	92
Figura 40. Flujograma que describe el funcionamiento del código para el modo Manual.	93
Figura 41. Flujograma que describe el funcionamiento del código para la interfaz.	96
Figura 42. Zonas de interés en la pestaña principal de la interfaz de usuario.	97

Figura 43. Pestaña secundaria de la interfaz de usuario.	97
Figura 44. Comportamiento del flujo de agua respecto al cambio de apertura en la electroválvula.	101
Figura 45. Temperatura de salida y de entrada en la planta.	101
Figura 46. Temperaturas de compresión y descompresión del refrigerante en la planta.	102
Figura 47. Presión en el sistema donde se observa la caída en la presión del refrigerante.	102
Figura 48. Las tuberías sin presión.	103
Figura 49. Primera prueba de presurización con aire seco en la planta.	104
Figura 50. Presión de aire seco en la planta en la segunda prueba.	104
Figura 51. Prueba de presión y carga de refrigerante en la planta.	105
Figura 52. Gráficas de: a) flujo de agua en el sistema y b) apertura de electroválvula.	105
Figura 53. Temperaturas de agua de entrada y de salida en carga de refrigerante.	106
Figura 54. Temperaturas de compresión y descompresión del refrigerante durante la carga.	106
Figura 55. Gráficas de: a) flujo de agua en la planta y b) apertura en electroválvula en 10%.	107
Figura 56. Gráficas de: a) flujo de agua en la planta y b) apertura en electroválvula en 40%.	108
Figura 57. Grafica de la temperatura de salida en compresor ON	109
Figura 58. Grafica del delta de temperatura en compresor ON	110
Figura 59. Grafica de la temperatura T2	110
Figura 60. Grafica comparativa de la temperatura T3.	111
Figura 61. Grafica de la presión del refrigerante dentro de la tubería de cobre con el compresor en funcionamiento.	111
Figura 62. Grafica del Qw sin controlador	112
Figura 63. Grafica del COP sin controlador	113

Figura 64. Radiación solar en una prueba medida desde Sensor Davis.	114
Figura 65. Grafica de la temperatura de salida en compresor OFF	115
Figura 66. Radiación solar presente en las pruebas con 10% y 100% de apertura en electroválvula.	115
Figura 67. Grafica del Qw en compresor OFF	116
Figura 68. Ubicación de sensores y actuadores en la planta.	117
Figura 69. Diagrama de bloques del proceso de control.	118
Figura 70. Entradas, salidas y controlador fuzzy.	119
Figura 71. Conjuntos para el universo “error”	120
Figura 72. Membresía para los conjuntos en la variación de error.	121
Figura 73. Membresía para el universo de salida del controlador.	123
Figura 74. Diagrama de bloques en MatLab que describe el algoritmo de control difuso.	125
Figura 75. Membresía para los conjuntos de Error en grados Celsius.	125
Figura 76. Universo discurso para la variable de entrada “derror”.	126
Figura 77. Universo discurso para la variable de salida “PWM”.	126
Figura 78. Reglas del controlador	126
Figura 79. Superficie de respuesta para la salida del controlador difuso.	127
Figura 80. Simulación cuando las entradas son negativas en el controlador.	128
Figura 81. Simulación cuando las entradas son cero en el controlador.	129
Figura 82. Simulación cuando las entradas son positivas en el controlador.	130
Figura 83. Flujograma que describe el funcionamiento del código final	131
Figura 84. Ubicación de modulo en el campus para aprovechar radiación solar.	131
Figura 85. Variación de temperaturas de entrada y salida de agua en prueba 1.	132

Figura 86. Gráficas de: (a) bits en PWM y (b) apertura de electroválvula en la primera prueba del controlador.	133
Figura 87. Gráficas de: (a) radiación incidente y (b) presión de refrigerante en la primera prueba del controlador.	134
Figura 88. Gráficas de: (a) radiación incidente y (b) presión de refrigerante en la segunda prueba del controlador.	134
Figura 89. Variación de temperaturas de entrada y salida de agua en prueba 2.	135
Figura 90. Gráficas de: (a) bits en PWM y (b) Apertura de electroválvula en la segunda prueba de funcionamiento.	135
Figura 91. Pestaña principal de la interfaz durante sesión de trabajo.	136
Figura 92. Pestaña secundaria de la interfaz de usuario en sesión de trabajo.	136
Figura 93. Certificado de ponencia en simposio.	137
Figura 94. Certificado de ponencia en simposio.	138
Figura 95. Carta de aceptación de ponencia en la Semana de ciencia, tecnología e innovación.	139
Figura 96. Evidencia de la ponencia por medio de video.	140
Figura 97. Evidencia de la participación en el evento	141

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Compresor Off.	69
Tabla 2. Compresor On.	70
Tabla 3. Datos obtenidos del sensor YF-S201 y experimentales	87
Tabla 4. Comparación de datos teóricos con datos experimentales.	89
Tabla 5. Datos obtenidos del sensor DAVIS 6450 vs medidor SM-206.	90
Tabla 6. Potencia en el Compresor	113
Tabla 7. Base de reglas para el controlador difuso	123

RESUMEN

En este documento se presenta el desarrollo e implementación de un sistema de control de temperatura tipo difuso en una placa de desarrollo Arduino Mega 2560, el controlador se desarrolló por medio de la librería eFLL, donde logró el calentamiento de agua por medio de un colector solar plano con asistencia de una bomba de calor. Se realizó un estudio teórico de la planta para encontrar como se realiza la transferencia de calor al agua y que variables son claves en el proceso, se realizó una instrumentación de temperatura, presión y radiación, parámetros claves, además, desde una interfaz de usuario desarrollada en el lenguaje de programación Python, donde se visualizan la información en tiempo real en la planta, se aprecian las gráficas donde se puede analizar la variación de datos, se pueden manipular los actuadores desde un modo manual para realizar pruebas en el módulo hasta un punto de temperatura máxima posible. Se diseñó y simuló en Matlab una estrategia de control, que funciona desde el modo automático en la interfaz, donde se solicita una temperatura deseada dentro del rango de trabajo del sistema. Se realizaron pruebas de funcionamiento entre los días 13 y 22 del mes de noviembre del año 2019, desde las 8:00 a.m. hasta las 6:30 p.m., dentro del campus de la Universidad Francisco de Paula Santander de la ciudad de Cúcuta, Colombia. Este sistema logró el calentamiento de agua a temperaturas entre 35 y 60 °C con una precisión de ± 1 °C.

ABSTRACT

This document presents the implementation of a fuzzy type temperature control system on an Arduino Mega 2560 development board, the controller was developed through the eFLL library, where it achieved the heating of water by means of a flat solar collector with assistance from a heat pump. A theoretical study of the plant was carried out to find out how the heat transfer to water is carried out and which variables are key in the process, an instrumentation of temperature, pressure and radiation was carried out, key parameters, in addition, from a user interface developed In the Python programming language, where the information is displayed in real time in the plant, the graphs are appreciated where the variation of data can be analyzed, the actuators can be manipulated from a manual mode to perform tests on the module up to a point maximum possible temperature. A control strategy was designed and simulated in MATLAB, which works from the automatic mode in the interface, where a desired temperature is requested within the working range of the system. Functional tests were carried out between November 13 and 22, 2019, from 8:00 a.m. until 6:30 p.m., within the campus of the Francisco de Paula Santander University in the city of Cúcuta, Colombia. This system achieved the heating of water to temperatures between 35 and 60 °C with an accuracy of ± 1 °C.

Introducción

Colombia se encuentra en un despliegue en el uso de energía solar desde el año 2008, figura 1, aunque el país se encuentra muy lejos de la capacidad nominal instalada a nivel mundial, que fue de 297.019 Mega Vattios (MW) en el 2016 (The International Renewable Energy Agency, 2018, pág. 52), año en el que Colombia instaló equipos para un total de 63 MW (The International Renewable Energy Agency, 2018, pág. 56), el comportamiento de la gráfica es de tipo exponencial, por tanto, se espera que continúe el crecimiento de la aplicación de generación de energía renovable de este tipo en los próximos años.

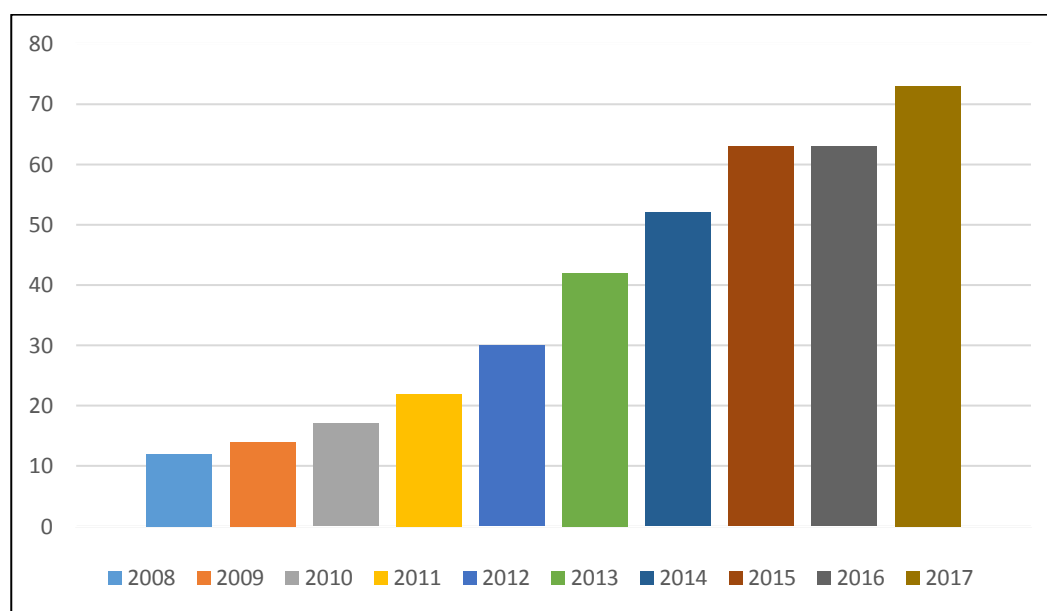


Figura 1. Capacidad instalada de energía solar en Colombia (en MW) entre los años 2008 a 2017.

Fuente: Grafica hecha a partir de los datos tomados de la Agencia Internacional de Energías Renovables (The International Renewable Energy Agency, 2018, pág. 56)

Se destaca el potencial de los existentes y emergentes sistemas de energía solar térmica y los híbridos fotovoltaicos (PV-T) en satisfacer la creciente demanda global de energías renovables y sustentables. Las aplicaciones de la energía solar-térmicas están atrayendo cada vez más atención en el campo de investigación de energía solar, debido a su alto rendimiento en la eficiencia de conversión y el almacenamiento de energía. Los colectores solares y los sistemas de almacenamiento de energía térmica son los dos componentes principales para el aprovechamiento de la energía solar-térmica. Sobre datos de sistemas que utilicen energía solar-térmica se tiene que, a finales de 2014, la capacidad operativa global de energía solar-térmica concentrada (CSP), que es la utilización de esta energía solar para el calentamiento de líquido, comúnmente usando espejos, aumentó en un promedio anual del 46%. España es el país que más usa este tipo de sistemas, seguido de Estados Unidos durante 2014 (REN21, 2015, pág. 64), aunque hay países que emergen con un gran interés en CSP, como se puede ver en la figura 2.

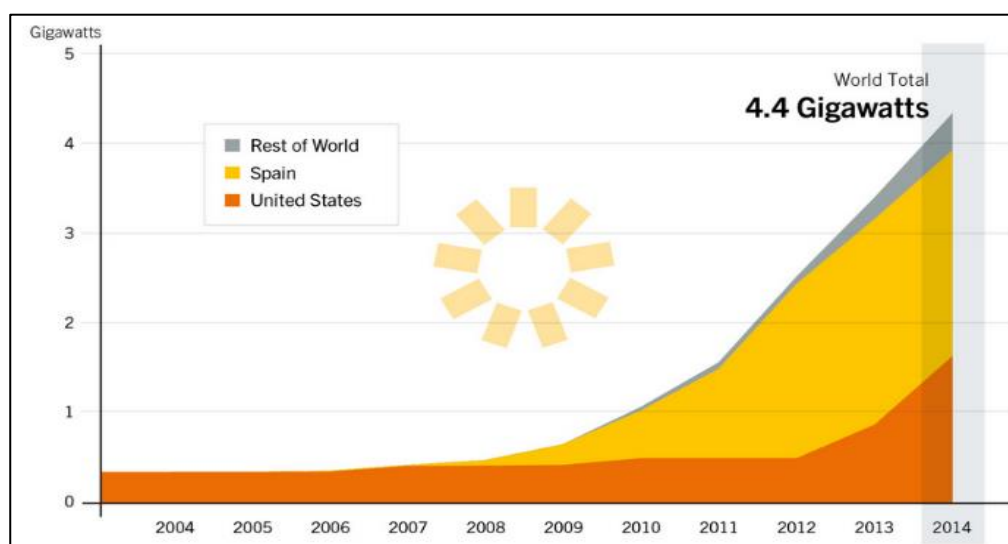


Figura 2. Comparación de la capacidad instalada de energía solar-térmica concentrada entre los años 2008-2014.

Fuente: Renewables 2015 global status report. (REN21, 2015, pág. 64)

En la Universidad Francisco de Paula Santander en el Laboratorio LE206, se desarrolló un sistema de calentamiento de agua por medio de una bomba de calor con asistencia solar, por ello, haciendo uso de energía solar-térmica concentrada, además, de energía de fuentes convencionales para la bomba de calor, por tanto, se convierte el sistema en híbrido. Este sistema logró el calentamiento de agua a una temperatura baja, menores a 100°C (Musunuri, Sánchez, & Rodríguez, 2007, pág. 15), para su uso doméstico; su operación se da de dos maneras totalmente independientes, sus procesos de marcha ocurren cuando se conecta el sistema a la red de energía o en otro caso, tomando radiación solar para soportar su funcionamiento por medio del colector solar, proceso de selección que ocurre de manera manual.

Con la finalidad de mejorar el proceso de elección de la fuente de energía del sistema, haciendo el proceso de manera eficiente, en el siguiente libro se expone el diseño implementación de una estrategia de control para un sistema que cuenta con una bomba de calor, que además tiene asistencia solar por medio de un colector; el cual sirvió para generar una respuesta adecuada según las condiciones en el entorno.

A continuación, será descrito de manera secuencial en este documento todo el proceso en donde se basa el diseño del controlador para la bomba de calor con colector solar para el Laboratorio de Electrónica (LE206) de la Universidad Francisco de Paula Santander en la ciudad de San José de Cúcuta.

1. Planteamiento del problema

1.1. Título

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA UNA BOMBA DE CALOR CON ASISTENCIA SOLAR

1.2. Descripción del problema

El Laboratorio de electrónica (LE206) que se encuentra dentro del campus de la UPFS, cuenta con un módulo calentador de agua que opera con una bomba de calor híbrida con un colector solar, el cual se puede ver en la figura 3, donde actualmente el funcionamiento se realiza ingresando el valor en grados celsius de la temperatura de agua requerida por medio de una interfaz en el programa LabView, obteniendo el líquido en el punto de temperatura requerido, este proceso se realiza mediante dos casos, por el funcionamiento de compresor de la maquina térmica, o por el colector solar que transfiere calor al agua, de modo que el sistema de calentador de agua trabaja manualmente en la elección del método de acción en la temperatura del fluido, este modo de trabajo no permite la optimización en el buen uso de las energías aplicadas al sistema, además de retardos en el accionar del sistema al encender o apagar tipo on/off la bomba de calor en caso de creerlo conveniente, lo que lleva a buscar una solución para mejorar el aprovechamiento de la energía generada desde el colector en el mayor tiempo que sea posible, y apoyar cuando sea necesario con la bomba de calor, de modo que, el sistema genere una respuesta adecuada según las condiciones del entorno en el que se encuentre operando.

Planteada la problemática existente en el sistema, se pretende realizar la instrumentación necesaria para la medición de variables de flujo de entrada y salida de agua del sistema, radiación solar incidente en el colector, además de temperatura del agua en la entrada y salida del sistema, además, de la presión del refrigerante con el que funciona el compresor, para posteriormente, recibir estos datos en un sistema embebido, monitorear las distintas variables y ver sus reacciones en tiempo real, bajo la influencia de un algoritmo de control moderno, que podrá ser monitoreado para el usuario a través de una interfaz para el ingreso de la temperatura del agua requerida.



Figura 3. Modulo calentador de agua hibrido.

1.2.1. Formulación del problema.

Dando un enfoque en lo mencionado anteriormente, se plantea la siguiente pregunta:
¿Cómo diseñar e implementar un sistema de control para una bomba de calor hibrida con colector solar utilizando lógica difusa?

2. Justificación

Con la realización del proyecto el sistema debe tener un controlador moderno y monitoreo automático que podrá usarse para obtener agua a una temperatura requerida, de modo que el funcionamiento del sistema de calentamiento híbrido se puede ajustar de acuerdo con las previsiones meteorológicas y los datos obtenidos del comportamiento de las variables significativas que serán recibidas en un Arduino Mega 2560, mediante los sensores de temperatura (PT100), sensor de radiación (DAVIS 6450), además, del sensor de presión (SPT25-10-0300A), el monitoreo de estas magnitudes son necesarios para evaluar el desempeño del sistema y para predecir estados de operación, además, en caso de no poder o la irradiancia es demasiado baja en el colector solar, la energía térmica se suministrará desde un sistema de respaldo que se basa en fuentes de energía convencionales por medio de una bomba de calor.

2.1. Impacto hecho

Se espera al finalizar el proyecto, lograr implementar un controlador en el sistema de calentamiento de agua residencial a través de una bomba de calor híbrida con colector solar y estudiar el comportamiento del controlador a diferentes perturbaciones.

2.2. Beneficios tecnológicos

Los beneficios tecnológicos se ven enfocados en el uso de tarjetas de desarrollo como el Arduino, esta placa de desarrollo trae el programador incorporado, en la plataforma PIC es necesario comprar el programador por separado además del tiempo que se ahorra para programar

y probar el código en funcionamiento, esto contrasta con Arduino en el que se puede programar y probar el funcionamiento del código al instante de compilar, además usar las librerías para la programación en Arduino es muy sencillo y fácil de aprender en comparación al basado en ensamblador, o assembler de los PIC. El software IDE de Arduino se ejecuta en sistemas operativos Windows, Macintosh OSX y GNU/Linux, por lo tanto, es un software disponible en los sistemas operativos más populares, también se resalta que es Open Source por lo que se puede acceder a toda parte del circuito y del código de las librerías, pudiendo modificarlas sin ninguna licencia, y tiene infinidad de información disponible y una comunidad grande. El uso de software libre en los sistemas de desarrollo contribuyen a la expansión de la programación, como es el gusto de los usuarios por Python, por ser muy legible, cualquier otro programador puede leer y trabajar sobre el programa escrito en Python y, los módulos están bien organizados a diferencia de otros lenguajes, Python es portable (ya sea en Mac, Linux o Windows) en comparación con otros lenguajes, las librerías que más se necesitan al día a día en programación, ya están dentro del interprete, no se tiene la necesidad de instalarlas adicionalmente con en otros lenguajes. Algo muy importante para el desarrollo del lenguaje Python es la comunidad, la misma comunidad cuida el lenguaje y casi todas las actualizaciones se hacen de manera democrática, además de tener en la red múltiples soluciones a cualquier problema que se presente. Se implementará en una tarjeta de desarrollo (Arduino) como sistema de adquisición de datos, que permitirá procesar posteriormente de manera matemática y gráfico las variables que influyen en los procesos, visualizando en una interfaz, lo cual hace que el proyecto integre diferentes herramientas tecnológicas, tanto de hardware como de software.

2.3. Beneficios económicos

Reducir costo a del proyecto con el uso de sistemas de desarrollo embebidos como Arduino en comparación a tarjetas DAQ de National Instruments y los PLC. Por otro lado, al reducir el tiempo de reacción y toma de decisiones autónomas en el sistema mediante la implementación de un controlador, permitirá optimizar la eficiencia representándose en reducir consumos energéticos, porque se priorizará el funcionamiento del colector solar sobre el compresor según modelo estático identificado. Haciendo uso de herramientas de licencias libres de los sistemas de desarrollo y el lenguaje de programación Python, permitiendo la disminución en costos viable del proyecto.

2.4. Beneficios Sociales

Al usar una bomba de calor hibrida con colector solar como una herramienta de mantener agua a una condición de temperatura, es una alternativa en comparación con el uso clásico de duchas eléctricas que representan consumos por encima de los 1000 watts, lo que representa impactar en la conservación ambiental para el no deterioro del planeta; también se ejercerá una visibilidad social positiva para la comunidad, como alternativas que se vienen investigando dentro de la calidad de educación superior alcanzada, en la búsqueda de soluciones a problemáticas del entorno residencia rural o local.

2.5. Beneficios institucionales y empresariales

Los beneficios institucionales que aporta este proyecto se ven reflejados en la Universidad Francisco de Paula Santander, ya que por medio de este proyecto se deja una base sobre la aplicación de una estrategia de control aplicada, el uso en una tarjeta de desarrollo, demostrando la aplicación de materias vistas en el programa, como la instrumentación electrónica, los sistemas de control, microcontroladores, comunicaciones electrónicas y procesamiento de señales, aportando conocimiento a los estudiantes y docentes tanto de los grupos de investigación como de otras carreras interesadas en este tipo de proyectos.

También contribuyendo con el apoyo que se da al hacer de conocimiento del público en general proyectos en los que se refleje nuestro conocimiento en el área de instrumentación y control, colaborando así para mantener el registro calificado y certificación en alta calidad en el programa.

3. Alcances

El proyecto tiene un alcance definido por su tipo y resultados esperados luego de su diseño, y también de la implementación del mismo, los cuales pueden observarse a continuación:

3.1. Tipo de proyecto

El diseño e implementación de un sistema de control para una bomba de calor con asistencia colector solar es de tipo descriptivo y exploratorio, es descriptiva porque se aplicaron conocimientos adquiridos de electrónica, instrumentación y control de procesos para garantizar alcanzar la temperatura de referencia que se requiere, además de exploratoria porque el sistema abordado tiene particularidades, partiendo del hecho, que fue diseñado y ensamblado por estudiantes (Jaimes & Bueno, 2017) de la UFPS, y como se registra en los antecedentes, el desarrollo de un algoritmo de control avanzado aplicado a las bombas de calor híbrido con asistencia colector solar como la del sistema que se presenta no ha sido abordado y/o divulgado, por tanto este proyecto nos acercará a “familiarizarnos” con el control de este tipo de sistemas de transferencia de energía.

3.2. Resultados esperados

Al implementar el proyecto se cumplieron los objetivos del proyecto, los resultados directos e indirectos tras la implementación del proyecto se pueden ver a continuación:

3.2.1. Resultados Directos.

Se logró al tener implementado el proceso de control de temperatura, garantizando la referencia requerida por el usuario.

Optimizar la selección de fuente de energía térmica del sistema, de forma que, ante variaciones en los factores ambientales, logre optimizar el sistema para alcanzar la temperatura requerida, siempre priorizando el uso del colector solar contribuyendo al uso de energías limpias.

Los datos obtenidos desde los sensores de radiación solar (6450 Davis) incidente en el colector, presión del refrigerante (SPT25-10-0300A) y temperatura del agua (PT100) de entrada y salida del sistema, serán transmitidos al sistema de adquisición y posteriormente por medio de una interfaz gráfica ser monitoreados en tiempo real.

3.2.2. Resultados Indirectos.

Se consiguió fortalecer la parte investigativa impulsada desde los semilleros y grupos de investigación de nuestra universidad y nuestra carrera, permitiendo a los demás estudiantes continuar con esta línea de trabajo si así lo desean, dando un crecimiento en conocimientos y permitiendo continuar con el registro calificado y la acreditación en alta calidad, es importante resaltar que, si se quiere lograr esta permanencia, es necesario divulgar los resultados obtenidos en este proyecto.

4. Limitaciones y delimitaciones

4.1.Limitaciones

El sistema de monitoreo y supervisión se acoplará única y exclusivamente a los sensores que se instalen en el proceso del desarrollo del proyecto puesto que cualquier cambio al sistema, o mejora del mismo implica la actualización inminente de la aplicación desarrollada para la supervisión. El algoritmo de control solo tendrá en cuenta las variables significativas del sistema, puesto que la presión del refrigerante con el que cuenta el compresor no revela más que el buen funcionamiento o no del mismo, pudiendo ser usada para protección de esta máquina. El Arduino Mega 2560 cuenta con un microcontrolador ATmega2560, con una frecuencia de reloj de 16MHz, 8 KB de memoria SRAM, 4 KB de memoria EEPROM y memoria flash de 256 KB de los cuales 8 KB son usados por el bootloader, características que hacen que la tarjeta no sea la opción más idónea para la implementación del sistema de control, por esto, será usado para el acondicionamiento de señales de los sensores, primordialmente.

4.2. Delimitaciones

Por delimitaciones cabe resaltar que el proyecto se desarrollará en la ciudad de San José de Cúcuta, en las instalaciones de la UFPS, con unos parámetros climáticos (IDEAM, 2012) de temperatura promedio entre los años 1981 a 2010 de 27°C, con una máxima de 42.5°C y mínima de 22.7°C, además de un promedio de 2228.9 horas de sol anual, y 71% de humedad relativa. Este sistema, pretende el calentamiento de agua a una temperatura menor a 100°C. Se

abarcarán las siguientes variables físicas, radiación solar incidente en el colector, flujo de agua de entrada, presión del refrigerante del compresor y temperatura de salida del agua en el sistema. Esto se debe, a que en el proceso de calentamiento del agua influyen de manera significativa y directa en la respuesta del sistema. Las demás variables, que se pudieran encontrar, entre otras, no intervienen de manera significativa en este proceso, por ello, quedan descartadas para el desarrollo del algoritmo de control.

5. Objetivos

5.1. Objetivo general

Fortalecer el estudio de sistemas de control aplicado a una bomba de calor con asistencia de colector solar plano.

5.2. Objetivos específicos

- Identificar el modelo que rige el comportamiento del sistema híbrido, sobre el cual se basará el algoritmo de control para suministrar la temperatura de salida de agua solicitada.
- Determinar los rangos óptimos de trabajo del sistema, considerando las variables de radiación solar, flujo de agua de entrada, presión del refrigerante y temperatura del agua de salida requerida para definir en qué rango de temperaturas el sistema funcionará únicamente por energía solar-térmica y en qué rango debe actuar la bomba de calor.
- Implementar un sistema de adquisición de datos por medio del Arduino Mega 2560, para así conocer el comportamiento de las variables principales del sistema.
- Desarrollar una estrategia de control tipo Fuzzy para el sistema, que evalúe los datos obtenidos desde los sensores de caudal, radiación solar en el ambiente y

temperatura de agua de entrada para aplicar la respuesta correcta según la solicitud de temperatura presente.

- Evaluar el funcionamiento del controlador en el sistema de acuerdo a diferentes condiciones de trabajo.
- Divulgar los resultados obtenidos en el desarrollo del proyecto a la comunidad académica.

6. Marco referencial

6.1. Antecedentes

TITULO: The performance of a solar assisted heat pump water heater using CO_2 in a transcritical cycle.

AUTORES: M. Raisul Islam, K. Sumathy, J. Gong, Samee Ullah Khan.

PAIS: Estados Unidos.

AÑO: 2012

INSTITUCIÓN: North Dakota State University.

RESUMEN: Este estudio informa sobre los análisis numéricos de un ciclo transcrito de CO_2 en un sistema de calentamiento de agua con bomba de calor asistida por energía solar, en el que se utiliza como evaporador el colector solar de tubo en U de tubo de vacío. Este modelo de simulación puede predecir las características operativas para condiciones meteorológicas moderadas de Dakota del Norte. El propósito principal de este trabajo es simular el rendimiento general del ciclo de la bomba de calor variando la velocidad del compresor. A partir del análisis, el valor del coeficiente de rendimiento (COP) se predice de 1.5 a 2.8 con tres insolaciones solares en promedio diferentes. Los resultados mostraron que el rendimiento del sistema se vio

significativamente influenciado por la velocidad del compresor y la irradiación solar. Este estudio también calculó la eficiencia del colector instantáneo y se encontró en el rango de 50 - 55% (Islam, 2012).

TITULO: Simulation study on the thermal performance of a direct-expansion solar-assisted heat pump for water heating in Kermanshah climate

AUTORES: Sobhan Fathollahi, Habibollah Safarzadeh.

PAIS: Irán.

AÑO: 2015.

INSTITUCIÓN: Razi University, Kermanshah.

RESUMEN: Las bombas de calor de expansión directa asistidas por energía solar (Direct-Expansion Solar-Assisted Heat Pumps, DX-SAHP) se han utilizado ampliamente en el calentamiento para el consumo de edificios e instalaciones industriales. Estos sistemas transfieren energía de una fuente de temperatura más baja a una fuente de temperatura más alta. En los sistemas DX-SAHP, para optimizar la transferencia de calor de la radiación solar al refrigerante, se utiliza el colector solar de placa plana como evaporador. En este documento, el rendimiento térmico de un DX-SAHP se ha estudiado mediante simulación numérica para calentar el agua de una casa en Kermanshah. El sistema emplea principalmente un colector solar

de placa plana con un área de superficie de 4 m^2 , un tanque de agua caliente con un volumen de 150 L, un compresor hermético de tipo rotatorio, una válvula de expansión termostática y refrigerante R-134a que también se utiliza para el fluido en el sistema. Los resultados muestran en las horas de operación del sistema, durante diferentes meses en el clima de Kermanshah, varían entre 37 a 130 horas y el promedio mensual de Coeficiente de operatividad o de rendimiento (COP) y la eficiencia del colector solar varían entre 3.96 a 6.71 y 68 a 99 por ciento, respectivamente. El efecto de varios parámetros, incluida la radiación solar, la temperatura ambiente, el área del colector, la velocidad del compresor, el número de cubiertas del colector y la velocidad del viento se han analizado en el rendimiento térmico del sistema (Sobhan Fathollahi, 2015).

TITULO: Smart Control Strategies for Heat Pump Systems.

AUTORES: Davide Rolando, Hatef Madani.

PAIS: Suecia.

AÑO: 2018.

INSTITUCIÓN: KTH Royal Institute of Technology of Stockholm, Estocolmo, Suecia.

RESUMEN: trabajaron en un control predictivo de pronóstico del tiempo según requerimientos del usuario, este trabajo se presentó en el “IEA heat pump conference” edición 2017, realizado en Rotterdam. La propuesta se centra en el desarrollo de un control lógico basado en que el sistema funcione reduciendo el consumo eléctrico, el enfoque de programación es dinámico de manera que considera la cantidad de energía requerida y, por lo tanto, se basa en la anticipación dinámica de la solicitud de energía.

En particular, el tiempo de anticipación se calcula por la relación entre la demanda de energía futura y la tasa de calor esperada del condensador basada en un promedio de la potencia del condensador. Los resultados generales muestran una potencial mejora de ahorro de energía del 6 al 15% con una disminución considerable de la desviación de la temperatura interior desde el punto de ajuste y una reducción significativa del uso del calentador auxiliar (Davide Rolando, 2018).

TITULO: Variable fuzzy control for heat pump operation.

AUTORES: Eunjun Cho, Manyeong Ha, Sedong Chang, Yoonjei Hwang.

PAIS: Holanda.

INSTITUCIÓN:

AÑO: 2011.

RESUMEN: En el documento expusieron un controlador variable fuzzy para bomba de calor. El propósito de este estudio fue realizar un sistema de control que pudiera mantener simultáneamente la operación en alta eficiencia en el estado óptimo y asegurar la confiabilidad controlando la apertura de la válvula de expansión electrónica en la consideración de las condiciones del entorno para que el sistema pueda lograr una operación rápida y estable en todas las condiciones de operación. Algunos de resultados de este proyecto son que el paso de apertura de la válvula de expansión electrónica para el control de la bomba de calor debe establecerse en el valor óptimo considerando el error de sobrecalentamiento y el gradiente de sobrecalentamiento, así como la capacidad del compresor, la temperatura interior, la temperatura exterior y las rpm del ventilador interior según las condiciones de funcionamiento, además, que el sistema se puede controlar de forma estable en condiciones exteriores bajas bajo -20°C (Cho, 2011).

TITULO: Preliminary analysis of the potential energy saving achievable with a predictive control strategy of a heat pump for a single-family house.

AUTORES: Giacomo Braida, Roberto Tomaseti.

PAIS: Italia.

INSTITUCIÓN: Politecnico di Milano, Italia.

AÑO: 2015.

RESUMEN: El presente trabajo informa sobre un estudio relacionado con la mejora potencial de los rendimientos energéticos de un sistema de calefacción basado en una bomba de calor para una casa unifamiliar sueca. El análisis se centra en el diseño de nuevas estrategias de control basadas en reglas que emplean predicciones perfectas del pronóstico del tiempo y la información del comportamiento humano. En particular, las señales consideradas son la temperatura exterior, la radiación solar, la ganancia interna debida a las actividades de los habitantes y el consumo de agua caliente doméstica (ACS). El estudio se realiza mediante el software de simulación TRNSYS® en el que se implementa el modelo del sistema de calefacción. Más específicamente, está compuesto por una unidad de bomba de calor de fuente terrestre (GSHP), un tanque de almacenamiento estratificado de trescientos litros y el elemento de construcción. Los rendimientos de las lógicas de control desarrolladas se evalúan utilizando un controlador de encendido / apagado de grado-minuto como caso de referencia. Los resultados muestran que las lógicas de control mejoradas dan como resultado un aumento de la eficiencia energética del sistema, así como una mejora de la estabilidad de las temperaturas interiores y de ACS (Giacomo Braida, 2016).

6.2.Marco teórico

6.2.1. Electroválvula TCN-02T de TCrystal.

TCrystal (Electroválvula, s.f.) fabrica la serie de electroválvulas TCN-02, que opera con un rango de torque de 15 Nm a 20 Nm, un ángulo de rotación de 90° a 270°, tiempo de arranques de 1 segundo, 10 segundos o 15 segundos, según las necesidades del proyecto, la alimentación es de 12 V a 24V DC. Además, cuenta con un panel en la parte superior de la electroválvula en el que se le pueden modificar ciertos parámetros de operación. Se puede observar en la figura 4.



Figura 4. Electroválvula TCN-02.

Fuente: TCrystal.com (Electroválvula, s.f.)

6.2.2. Sensor de temperatura Pt 100.

Los sensores Pt100 (electric), como se aprecia en la figura 5, son un tipo específico de detector de temperatura RTD (detector de temperatura por resistencia). La característica más

importante de los elementos Pt100 es que están fabricados con platino con una resistencia eléctrica de 100 ohmios a una temperatura de 0 °C y es con diferencia el tipo más común de sensor RTD. Generalmente se modelan de forma lineal, lo cual facilita su adaptación a proyectos o a la industria. Requieren de un circuito de acondicionamiento ya que su variación es perceptible solo con circuitos especiales de instrumentación.



Figura 5. Sensor Pt100 de dos hilos.

Fuente: Tipos de sensores Pt100 (Naylamp, s.f.)

6.2.3. Caudalimetro YF-S201.

El sensor de flujo YF-S201 (SENSOR & MODULOS) está construido de plástico sólido, así como se ve en la figura 6, es de acople directo para tubería de 1/2", mide el flujo del agua por medio de un rotor de agua interno que activa un sensor de efecto Hall, este envía pulsos por cada rotación. El sensor tiene tres cables: rojo (VCC: 5-18 V), negro (tierra, GND) y amarillo (salida de pulsos). Calibrado puede llegar a tener una precisión de hasta 10%. Pulsaciones del sensor $(\text{Hz})/7.5 = \text{Flujo del agua en L/min.}$



Figura 6. Sensor de flujo de líquido YF-S201.

Fuente: Amperka.ru (SENSOR & MODULOS)

6.2.4. Medidor de radiación solar Davis 6450.

El Davis 6450 (SENSOR DE RADIACION SOLAR), es sensor de radiación solar o piranómetro de precisión, como se ve en la figura 7, detecta radiación solar global, en longitudes de onda de 400 a 1100 nanómetros, lo que lo hace contar con una gama espectral ancha, el elemento difusor y la carcasa están cuidadosamente diseñados para una respuesta precisa del coseno. La señal de salida de este dispositivo es un voltaje análogo, entre 0 V y 3 V, su transductor es un fotodiodo, rango de medición de 0 a 1800 W/m², precisión de $\pm 5\%$ a fondo de escala y un desvío de $\pm 2\%$.



Figura 7. Sensor de radiación Davis 6450.

Fuente: Davis la radiación solar Sensor - ebay (forestry-suppliers, s.f.)

6.2.5. Medidor SM-206

El SM-206 (Senseit, s.f.) es un instrumento de medición de precisión para la irradiación solar que se puede ver en la figura 8, tiene muchos usos, para la investigación, meteorología y agricultura. Tiene un rango de medición desde 1 a 3999 W/m^2 , con una resolución de 0,1 W/m^2 , tomando muestras cada 0,25 segundos, opera en temperaturas entre 0 a 50 °C, requiere de una batería de 9V la cual le da una vida de operación de alrededor de 100 horas.



Figura 8. Medidor de radiación SM-206.

Fuente: Senseit (Senseit, s.f.)

6.2.6. Sensor de presión SPT25-10-0300^a.

Transmisor de presión ProSense (SENSOR DE PRESION), rango de medición desde 0 a 300 psi, sensor de acero inoxidable, salida analógica lineal de 0-10 VDC, o de 4 a 20 mA, según

se quiera, conexión de proceso NPT macho de 1/4 pulg., Voltaje de operación de 14 a 36 VCC, cable de 2 metros de largo, algunas de sus aplicaciones son instalación para el control de procesos y automatización, control de bomba y compresor, sistemas hidráulicos, sistemas neumáticos, monitoreo del motor, equipo de refrigeración, prensas y herramientas de máquina, por lo que se puede decir que es de uso general y de correcta utilidad en el proyecto. La imagen se observa en la figura 9.



Figura 9. Sensor de presión SPT25-10-0300A

Fuente: Automation Direct (Direct, s.f.).

6.2.7. Transistor BJT en modo corte-saturación

El transistor BJT, siglas de Bipolar Junction Transistor, es un dispositivo que dentro de sí contiene dos diodos PN, uno a continuación de otro en sentidos opuestos. El emisor emite o lanza portadores hacia la base para que al final los portadores se recojan en la zona llamada colector. Su forma esquemática la podemos ver en la figura 10, para el caso de un transistor NPN y PNP, identificando cada uno de los tres terminales con los que cuenta. El uso del BJT en corte

y saturación es de gran utilidad ya que puede funcionar como un switch digital que opera al voltaje que se quiera, siempre limitado por la fuente de alimentación usada, pero este circuito tiene algunas desventajas resulta que el circuito no es capaz de suministrar suficiente corriente para encender por ejemplo una bombilla, para estos casos se usa como circuito “puente” entre un relé y la bombilla, de modo que se alimenta el BJT con el voltaje de encendido de la bobina y se controla por la base la activación o no del relé. (Cirovic, 2003)

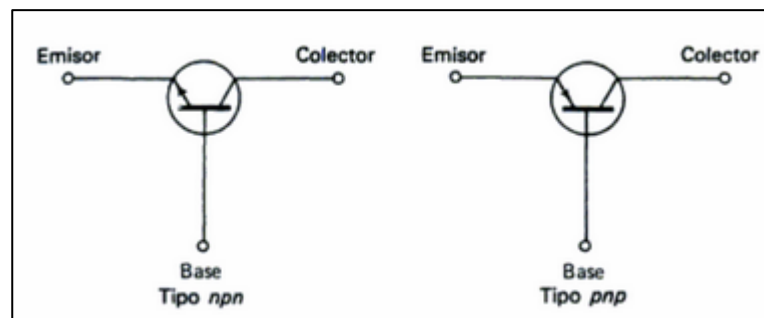


Figura 10. Esquema de un transistor NPN para que funcione en corte-saturación.

Fuente: Electrónica fundamental: dispositivos, circuitos y sistemas M. Cirovic. (Cirovic, 2003)

Nos vamos a guiar por la figura 11 para explicar este funcionamiento en el transistor BJT, para entrar en corte, se debe hacer cero la corriente que tiene en la base el transistor, por tanto, al aplicar un voltaje de 0 voltios en V_{BB} , cuando esta condición se cumple, la corriente que pasa por R_B es nula, lo que genera que el transistor no pueda conducir corriente por R_C , generando un voltaje de 0v. El transistor para que se encuentre en saturación, debe su voltaje colector-emisor sea de cero. Cuando $V_{CE}=0$, podemos determinar el valor de la corriente de saturación, que pasa por R_C , $I_{Csat}=V_{CC}/R_C$, por tanto, en R_C se tiene el mismo voltaje de V_{CC} .

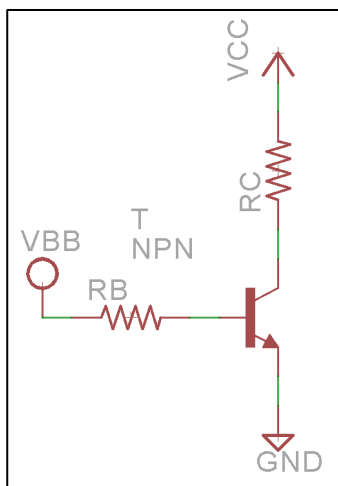


Figura 11. Esquema de un transistor NPN para que funcione en corte-saturación

Fuente: Herramientas tecnológicas profesionales (HETPRO, s.f.)

6.2.8. Relé

El relé, relevador o relevo (Viloria, s.f.), es un dispositivo electromagnético, cuyo esquema se puede observar en la figura 12, funciona como un interruptor controlado por medio de una bobina, según voltaje indicado en serigrafía, que acciona un electroimán haciendo que se cierre un circuito y permita hacer continuidad, el límite de voltaje y corriente del interruptor suele indicarse también en la serigrafía de cada relevo, comercialmente una manera común de encontrarlos es como se ve en la figura 13, con 4 o 5 terminales.

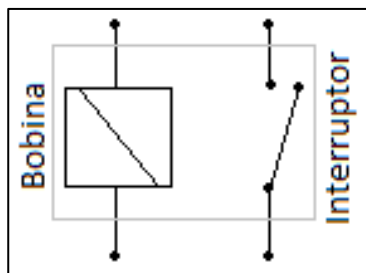


Figura 12. Esquema de interno de un relé.



Figura 13. Relé comúnmente usado en proyectos electrónicos.

Fuente: Brico Geek. (SPDT, s.f.)

6.2.9. MAX31865

El integrado MAX31865 (Maxim Integrated, s.f.), está optimizado de modo que facilita el uso de los detectores de temperatura resistivos, RTD, cuenta con detección de circuito abierto en la PT100, se suele usar para equipos industriales, médicos e instrumentación. En la figura 14, se muestra el módulo de la MAX31865, en el que se ven las conexiones externas que se hacen al integrado para realizar la conversión de la resistencia RTD a un valor digital, funciona con PT100 a PT1000, (100 ohms y 1000 ohms a 0 °C), es compatible con sensores de 2, 3 y 4 hilos, como lo muestra la figura 14, en los sectores que aparece una resistencia de nombre R_{cable} , que indica la resistencia del cable de conexión a la RTD. Usa comunicación SPI, como se ve a la izquierda de la figura 14, que tiene los pines DRDY, que se usa para indicarle al microcontrolador que el dispositivo se encuentra listo para su uso, los pines SDI, mencionado anteriormente con el nombre de MOSI, para el microcontrolador enviar datos, SCLK para la señal de reloj y sincronizar la transmisión, CS que indica el chip select, para la selección de comunicación con el dispositivo y SO, llamado anteriormente MISO, para que el dispositivo

envíe datos al microcontrolador. Este módulo cuenta con alta precisión, 15 bits que significa notar cambios de ± 0.03125 °C, con un tiempo de respuesta máximo de 21 milisegundos, funciona con un voltaje de alimentación de 3.3 V en VDD y necesita una corriente máxima de 5.75 miliamperios.

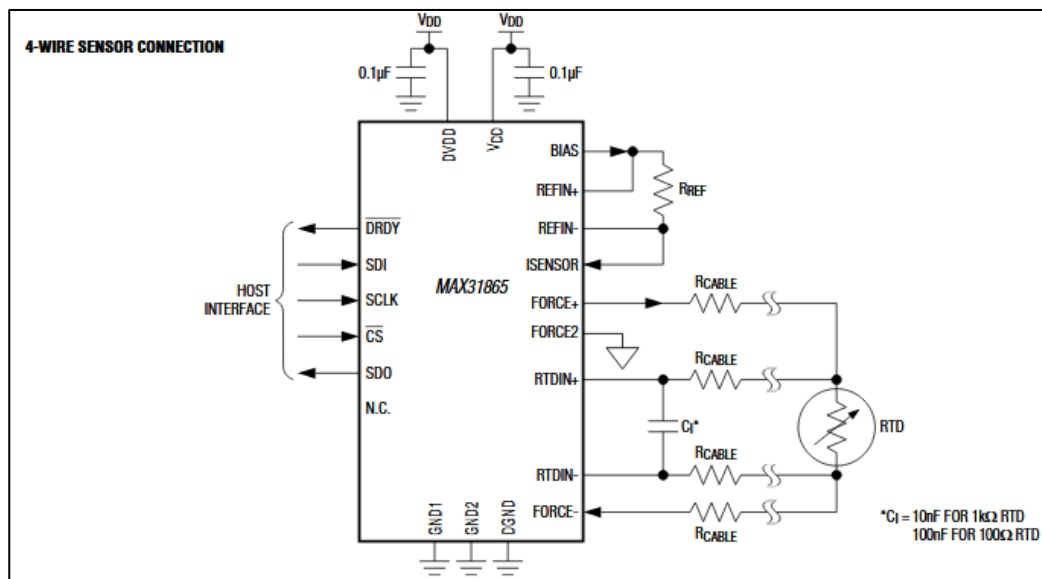


Figura 14. Esquema de conexiones del módulo MAX31865.

Fuente: Datasheet MAX31865. (Maxim Integrated, s.f.)

6.2.10. Optoacoplador

El optoacoplador o el optoaislador (Vishay Semiconductors, s.f.), es un dispositivo de emisión y recepción de luz por medio de un diodo led, que funciona como un interruptor que satura un componente optoelectrónico, como el de la figura 15, que cuenta con un led, que excita un fototransistor, que es un transistor sensible a la luz, este dispositivo sirve como aislador de

circuitos o elementos de control de los circuitos de potencia, que en caso de cualquier fallo, simplemente se deberá cambiar el optoacoplador.

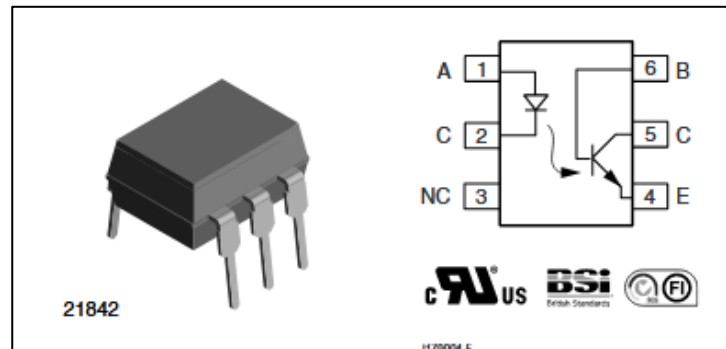


Figura 15. Esquema interno del optoacoplador 4n25.

Fuente: Vishay Semiconducotrs. (Vishay Semiconductors, s.f.)

6.2.11. Amplificador seguidor de voltaje

Los amplificadores seguidores de voltaje o aisladores (Robert F. Coughlin, Amplificadores inversores y no inversores, 1998), son circuitos en los que el voltaje de salida es igual al voltaje de entrada. Se utiliza debido a que su resistencia de entrada es alta (varios mega ohms), por tanto, extrae una corriente despreciable de la fuente de señal. Por tanto, si es necesario amplificar y/o invertir una señal de un circuito de alta impedancia y no se quiere tomar corriente de la señal, primero aísle la fuente de señal con un seguidor de voltaje. En la figura 16, se puede observar un circuito seguidor de voltaje montado en un amplificador LM741, entre el terminal 3 del amplificador y tierra, se encuentra la señal de entrada (E_i) al amplificador seguidor, notando que entre los terminales 2 y 3, el voltaje medido es de 0 voltios, teniendo a la salida $V_o = E_i$, en los terminales 7 y 4, se conectan las fuentes de alimentación de trabajo para el amplificador, fuente

positiva $V+$ en el pin 7 y negativa $V-$ en el pin 4, que a su vez determinan los límites positivos y negativos para el seguidor de voltaje, cabe resaltar que es posible usar solo una de las dos fuentes de alimentación para el amplificador, en caso que la fuente de entrada sea una señal continua, y se debe usar la fuente con su misma polaridad.

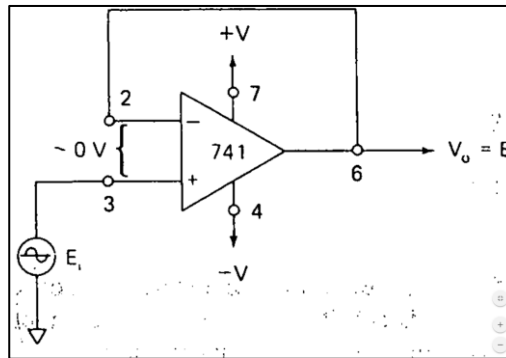


Figura 16. Esquema de un amplificador seguidor de voltaje en un integrado LM741.

Fuente: Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales, Robert F.

Coughlin, Frederick F. Driscoll. (Robert F. Coughlin, Amplificadores inversores y no inversores, 1998)

6.2.12. Amplificador no inversor

Un amplificador no inversor (Robert F. Coughlin, Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales, 1998), es un tipo de amplificador en el que la señal de salida tiene la misma polaridad que la señal de entrada, además que la señal de entrada cuenta con una ganancia a raíz de la configuración de resistencias conectadas en los terminales del amplificador. La resistencia de entrada del amplificador es muy grande, por lo general excede a 100M ohms. En la figura 17, se puede observar el esquema de montaje para un amplificador no inversor, en donde la señal de entrada llega al pin 3 del amplificador LM741, la resistencia de carga o el circuito de salida que

se beneficia del amplificador no inversor se conecta entre el pin 6 y tierra, las fuentes positivas y negativas, $V+$ y $V-$, se conectan en los pines 7 y 4, respectivamente del LM741, que a su vez determinan los límites positivos y negativos para la amplificación. La ganancia se para el ejemplo que se muestra en la figura 17, es igual a 5 veces la señal de entrada, como se detalla en la ecuación 1. Cabe resaltar que al igual que el amplificador seguidor, es posible usar solo una de las dos fuentes de alimentación para el amplificador, en caso que la fuente de entrada sea una señal continua, y se debe usar la fuente con su misma polaridad.

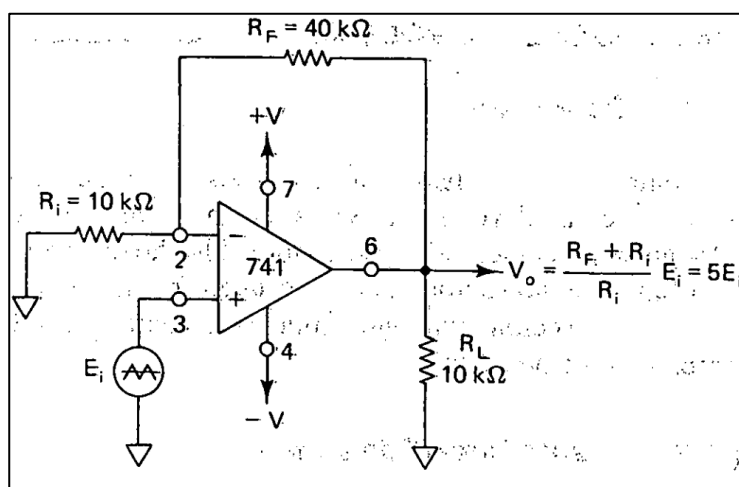


Figura 17. Esquema de un amplificador no inversor en un integrado LM741.

Fuente: Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales, Robert F.

Coughlin, Frederick F. Driscoll. (Robert F. Coughlin, Amplificadores inversores y no inversores, 1998)

$$V_{out} = V_{in} * \frac{R_f + R_i}{R_i} \rightarrow \text{Eq. (1)}$$

Donde:

- V_{out} : Voltaje obtenido del circuito no inversor (Voltios, V)
- V_{in} : Voltaje de entrada en el divisor (V)
- R_i : Resistencia usada entre la señal a amplificar y el pin 2 del integrado (Ohms, Ω)
- R_f : Resistencia usada entre el pin 2 y 6 del integrado (Ω)
- R_L : Resistencia de carga, donde se mide el voltaje de salida del circuito (Ω)

6.2.13. Circuito divisor de voltaje

Los divisores de voltaje (Boylestad, 2004) son circuitos muy simples, que como su nombre lo indica, dividen el voltaje de la fuente entre dos o más cargas conectadas en serie, obteniendo una fracción del voltaje de alimentación en cada resistencia. Es posible que se encuentren varias maneras de mostrar la conexión del circuito, como se ve en la figura 18.

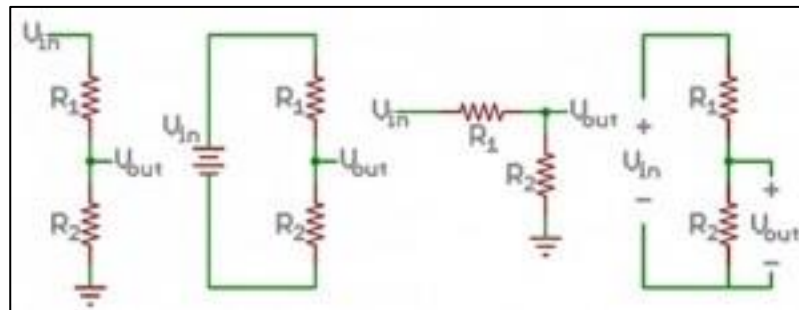


Figura 18. Esquema de montaje de un divisor de voltaje.

Fuente: 5Hertz Electrónica (5Hertz Electrónica, s.f.)

Esta regla puede ampliarse o no al voltaje presente en más de dos elementos en serie, el voltaje depende de todos los elementos presentes en el circuito, como V_{in} , que es la fuente de alimentación, se calcula como se muestra en la ecuación 2 (Eq. 2), en el numerador se tiene a la

resistencia a la que se requiere calcular su voltaje, y en el denominador, la suma de todas las resistencias en serie incluyendo a la que se le calcula el voltaje, teniendo en cuenta que si R_1 y R_2 son iguales, se tendrá que $V_{out} = V_{in}/2$, si R_2 es mucho mayor que R_1 , se obtendrá un voltaje (V_{out}) muy cercano al voltaje de entrada (V_{in}), y en el caso de que R_1 sea mucho mayor que R_2 , se tendrá un voltaje (V_{out}) muy pequeño al voltaje de entrada (V_{in}).

$$V_{out} = V_{in} * \frac{R_2}{R_1 + R_2} \rightarrow \text{Eq. (2)}$$

Donde:

- V_{out} : Voltaje obtenido desde el divisor (V)
- V_{in} : Voltaje de entrada en el divisor (V)
- R_1 : Resistencia usada en el circuito (Ω)
- R_2 : Resistencia de donde se mide el voltaje de salida del divisor (Ω)

6.2.14. Arduino Mega 2560.

Se debe tener en cuenta el tipo de proyecto que vamos a implementar y definir la cantidad de pines analógicos y digitales que se necesitan. Este primer ítem permite descartar placas simples que no tengan suficientes pines o, al contrario, descartar las de mayor número de ellos, reduciendo los costes. Se pretende conectar 4 sensores de temperatura, la opción más oportuna que se presenta es valorar los modelos de tarjetas embebidas que cuenten con mayor número de entradas digitales y analógicas. Las dos placas que cumplen los requisitos descritos

son Arduino Mega y Arduino Due. Tendremos en cuenta que Due es una versión más reciente de Arduino y esto, podría suponer problemas de compatibilidad, por lo tanto, la elección será utilizar Arduino Mega 2560. A continuación, se presenta la figura 19, tabla comparativa con los principales modelos de Arduino y otras variantes de diferentes fabricantes, para proceder a la selección.

Fabricante	Arduino	Arduino	Arduino	Arduino	Arduino	Arduino	Arduino	Netduino	Texas Instruments	Fundación Raspberry Pi
Modelo	Pro Mini	Nano	Uno	Mega / Mega 2560	Leonardo	Micro	Due	Netduino 2	Stellaris Launchpad LM4F120	Raspberry Pi Mod.B
Microcontrolador	AVR Atmega 168 ó 328 8bits	AVR ATmega168 ó 328 8bits	AVR ATmega 328 8bits	AVR ATmega2560 8bits	AVR ATmega 32u4 8bits	AVR ATmega 32u4 8bits	ARM SAM3X8E Cortex-M3 32bits	ARM STM32F2 Cortex-M3 32bits	ARM LM4F120HSQR Cortex-M4 32bits	ARM Broadcom BCM2835
Frecuencia	16Mhz	16Mhz	16Mhz	16Mhz	16Mhz	16Mhz	84Mhz	120Mhz	80Mhz	700Mhz
Memoria RAM	2KIB	2KIB	2KIB	8KIB	2.5KIB	2.5KIB	96KIB (64+32KIB)	60KIB	32KIB	512MIB
Memoria EEPROM	1KIB	1KIB	1KIB	4KIB	1KIB	1KIB	0	0	-	-
Memoria FLASH	16 ó 32KIB	16 ó 32KIB	32KIB	128 ó 256KIB	32KIB	32KIB	512KIB	192KIB	256KIB	-
Pines digitales entradas/salidas	14/14	14/14	14/14	54/54	20/20	20/20	54/54	20/20	43/43	8/8
Tensión/corriente pines digitales	3.3v ó 5v 40mA	5v 40mA	5v 40mA	5v 40mA	5v 40mA	5v 40mA	3.3v 3~15mA (130mA entre todos)	3.3v~5v 25mA (125mA entre todos)	5v	-
Pines analógicos entradas/salidas	6/0	8/0	6/0	16/0	12/0	12/0	12/2	6/0	-	-
Tensión/resolución pines analógicos	3.3v ó 5v 10bits (1024 valores)	5v 10bits (1024 valores)	5v 10bits (1024 valores)	5v 10bits (1024 valores)	5v 10bits (1024 valores)	5v 10bits (1024 valores)	3.3v 12bits (4096 valores)	5v 12bits (4096 valores)	-	-
Pines con interrupción externa	2	2	2	6	2	2	-	-	-	-
Pines PWM	6	6	6	15	7	7	12	6	-	-
Conexiones Serial / UART	1	1	1	4	1	1	4	4	8	Si
Conexiones I2C / TWI	1	1	1	1	1	1	2	1	4	Si
Conexiones ISP / ICSP	1	1	1	1	1	1	1	1	-	Si
Conexión USB	No (necesita adaptador externo)	Si	Si, USB-B	Si, USB-B	Si, Nativa, MicroUSB	Si, Nativa, MicroUSB	Si, Nativa, MicroUSB	Si, Nativa, MicroUSB	Si, Nativa, MicroUSB	Si, MicroUSB
Conexión USB de depuración	No	No	No	No	No	No	Si, MicroUSB	Si, MicroUSB	Si, MicroUSB	-
Conexión Bluetooth	No	No	No	No	No	No	No	No	No	-
Conexión WIFI	No	No	No	No	No	No	No	No	No	-
Conexión Ethernet	No	No	No	No	No	No	No	No	No	Si
Conexión USB Host	No	No	No	No	No	No	Si	No	Si	Si
Almacenamiento por SD	No	No	No	No	No	No	No	No	No	Si
Corriente en el pin de 5v	-	500mA	500~800mA	500~800mA	500~800mA	500mA	800mA	-	-	-
Corriente en el pin de 3.3v	-	50mA	50mA	50mA	50mA	50mA	800mA	-	-	-
Voltaje de alimentación por el USB	3.3v ó 5v (sin usb)	5v	5v	5v	5v	5v	5v	5v	5v	5v
Voltaje de alimentación recomendado por el Jack	3.35 -12 V (modelo 3.3v) ó 5 - 12 V (modelo 5v)	7~12v	7~12v	7~12v	7~12v	7~12v	7~12v	7.5~9v	-	-
Voltaje de alimentación limite por el Jack	-	6~20v	6~20v	6~20v	6~20v	6~20v	6~20v	-	-	-
Precio oficial	15+g	-	20€+g	40€+g	18€+g	18€+g	39€+g	~35\$+g	13\$+g	~43\$+g
Precio BBB	~4€	~9€	~10€	~12€	11€~	~16€	~38€	25~30€	~15€	~35€

Figura 19. Comparación de algunas tarjetas de desarrollo.

Fuente: Universidad Politécnica de Cartagena (Cartagena, 2017)

El Arduino Mega 2560 (ARDUINO MEGA 2560) es una placa de desarrollo basada en el microcontrolador ATmega2560. Tiene 54 entradas/salidas digitales (de las cuales 15 pueden ser usadas como salidas PWM), 16 entradas analógicas, 4 UARTs, un cristal de 16Mhz, conexión USB, jack para alimentación DC, conector ICSP, y un botón de reseteo. La placa Mega 2560 es compatible con la mayoría de shields compatibles para Arduino UNO. El Arduino Mega 2560 es una actualización que reemplaza al Arduino Mega. Este se aprecia en la figura 20.

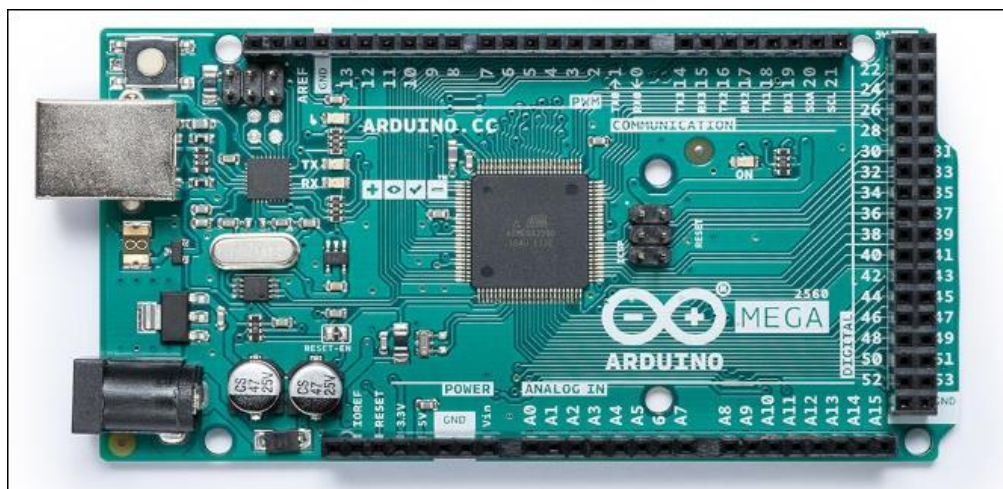


Figura 20. Arduino Mega 2560

Fuente: Amazon (Amazon, s.f.).

6.2.15. IDE Arduino

El software Arduino IDE (Arduino, s.f.), siglas de Integrated Development Environment en español entorno de desarrollo integrado, siendo de código abierto, donde existen innumerables códigos en la web que permiten el desarrollo de muchos proyectos y también funcionando como guía para quienes por primera vez lo usan, facilitando la escritura del código y su carga en el

integrado. Se ejecuta en Windows, Mac OS X y Linux, el entorno está escrito en Java. Este software se puede usar con cualquier placa Arduino.

6.2.16. Lenguaje de programación Python.

Python (s.f.) es un lenguaje de programación interpretado cuya filosofía hace hincapié en una sintaxis que favorezca un código legible. Se trata de un lenguaje de programación multiparadigma, ya que soporta orientación a objetos, programación imperativa y, en menor medida, programación funcional. Es un lenguaje interpretado, usa tipado dinámico y es multiplataforma. Es administrado por la Python Software Foundation. Posee una licencia de código abierto, denominada Python Software Foundation License, que es compatible con la Licencia pública general de GNU a partir de la versión 2.1.1, e incompatible en ciertas versiones anteriores.

6.2.17. Algoritmo de control-Fuzzy Logic (Lógica difusa).

La técnica de lógica difusa o lógica fuzzy (García, y otros, 2017), permite extraer conclusiones cuantitativas a partir de esquemas difusos, vagos o ambiguos propios del razonamiento cualitativo de los humanos. Ese tipo de razonamiento lógico, conformado por observaciones (antecedentes) y reglas cualitativas (base de conocimiento) es aprovechado para incorporar "inteligencia", por ejemplo, en sistemas de control y automatización de procesos industriales. El principio básico de un modelo basado en lógica difusa es el conjunto de reglas heurísticas, cuyas variables de entrada y salida, ambas lingüísticas, son representadas mediante

conjuntos difusos. Un controlador difuso está compuesto básicamente por los cuatro bloques operacionales que se muestran en la Figura 21, con “U” y “V” siendo la entrada y salida del sistema, respectivamente.

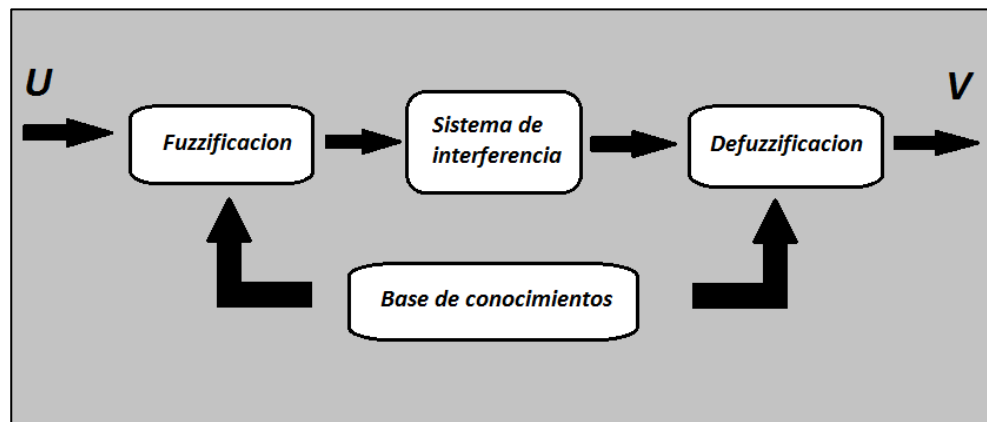


Figura 21. Estructura de un controlador difuso.

6.2.18. Protocolo de comunicación SPI.

Serial Peripheral Interface (SPI) (Arduino, s.f.), es un protocolo de datos en serie síncrono utilizado por microcontroladores para comunicarse rápidamente con uno o más dispositivos periféricos en distancias cortas (unos 2 metros). También se puede utilizar para la comunicación entre dos microcontroladores. Con una conexión SPI, siempre hay un dispositivo maestro (generalmente un microcontrolador) que controla los dispositivos periféricos, como se muestra en la Figura 22. Por lo general, hay tres líneas comunes a todos los dispositivos:

- MISO (Master In Slave Out): la línea Slave para enviar datos al maestro.
- MOSI (Master Out Slave In): la línea maestra para enviar datos a los periféricos.

- SCK (Serial Clock): pulsos de reloj que sincronizan la transmisión de datos generada por el maestro.

Además, de una línea específica para cada dispositivo:

- SS (Slave Select): el pin en cada dispositivo que el maestro puede usar para habilitar y deshabilitar dispositivos específicos. Cuando el pin Slave Select de un dispositivo está bajo, se comunica con el maestro. Cuando es alto, ignora al maestro. Esto le permite tener múltiples dispositivos SPI que comparten las mismas líneas MISO, MOSI y CLK.

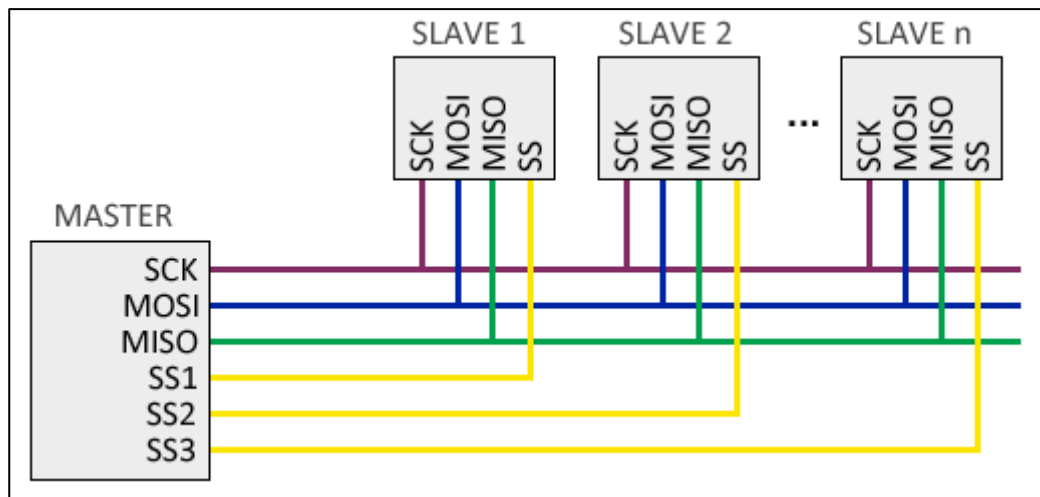


Figura 22. Conexiones entre maestro y esclavos para hacer posible la comunicación SPI

Fuente: Ingeniería, informática y diseño. (Llamas, s.f.)

6.2.19. Comunicación serial

Es la principal forma de comunicación que posee Arduino para transmitir información, todos los Arduinos tienen un puerto serial, a través del puerto serie se realiza de manera secuencial de a un bit a la vez, es como se envía información desde la computadora al microcontrolador, y viceversa, el Arduino IDE utiliza esta comunicación para subir el código en el Arduino.

Generalmente los pines para transmisión de datos son el 1 (Tx), y el 0 (Rx) para recibir. Cuando conectamos Arduino a un ordenador mediante un cable USB, el ordenador instala un puerto serie virtual (COM en el caso de sistema operativo windows) desde el cual podemos acceder al puerto serie de Arduino (Arduino, s.f.).

6.3.Marco legal

En el marco legal, el uso de licencias para el software y el hardware del que depende el proyecto, se detallaran a continuación:

- Matlab R2017b (64-bit)

Es un software muy usado en universidades y centros de investigación y desarrollo (LICENCIA DE MATLAB). La UFPS cuenta con “Classroom License”, licencia que está diseñada para ser instalada en aulas de clase o laboratorios académicos, con la finalidad de enseñar de profesores a estudiantes.

- Arduino

Es una compañía de fuente abierta y hardware abierto, aclara como lo indica su licencia (ARDUINO) “Licencia Pública General Reducida de GNU (LGPL) o la Licencia Pública General de GNU (GPL)” por ello, permitiendo la manufactura de las placas Arduino y distribución del software por cualquier individuo, inclusive se comparten los planos para que cualquier persona pueda personalizar a su gusto o hacerse su propia versión de una placa “Arduino”.

- Python

Posee una licencia de código abierto, denominada Python Software Foundation License (LICENCIA PYTHON), o PSFL, que es compatible con la Licencia pública general de GNU a partir de la versión 2.1.1, e incompatible en ciertas versiones anteriores; por tanto se nos permite hacer uso del software y del lenguaje de programación Python si manejamos versiones superiores a las descritas.

- Debian GNU/Linux

Debian GNU/Linux es un sistema operativo libre (LICENCIA DEIBIAN), desarrollado por miles de voluntarios de todo el mundo, que colaboran a través de Internet, por tanto, es legalmente correcto y permitido su uso en el proyecto.

- Ley 1715 de 2014

En la ley 1715 de 2014 (Colombia, 2014), por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional.

- Ley 142 de 1994

En la ley 142 de 1994 (Comercio) se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones.

- Ley 143 de 1994

En la ley 143 de 1994 (Minero-Energética), por la cual se establece el régimen para la generación, interconexión, transmisión, distribución y comercialización de electricidad en el territorio nacional, se conceden unas autorizaciones y se dictan otras disposiciones en materia energética.

7. Diseño metodológico.

7.1. Metodología

Objetivo 1. Identificar el modelo que rige el comportamiento del sistema híbrido, sobre el cual se basará el algoritmo de control para suministrar la temperatura de salida de agua solicitada.

Metodología: Se identificó el modelo matemático del sistema por medio de un diagrama de bloques, donde la energía que se transfirió al agua equivale a la energía que proviene del colector solar y la energía que adiciona el compresor; este modelo matemático nos ayudó a corroborar los datos obtenidos experimentalmente mediante la realización de graficas de superficie de respuesta, donde el comportamiento de estas graficas nos arrojó concordancia entre los datos hallados experimentalmente y los datos hallados mediante el modelo matemático.

Objetivo 2. Determinar los rangos óptimos de trabajo del sistema, considerando las variables de radiación solar, flujo de agua de entrada, presión del refrigerante y temperatura del agua de salida requerida para definir en qué rango de temperaturas el sistema funcionará únicamente por energía solar-térmica y en qué rango debe actuar la bomba de calor.

Metodología: Se graficó en dos superficies de respuesta las variables más significativas del sistema, las cuales fueron el flujo del agua de entrada, la temperatura del agua de salida y la radiación presente en el ambiente, en primer lugar, la gráfica para el caso en el que

estuvo encendido el compresor, y otra gráfica para el caso en el que no estuvo encendido el compresor, con lo cual se identificó las temperaturas máximas alcanzadas en ambos casos, por tanto, se pudo determinar los rangos de trabajo óptimos del sistema provenientes del modelo matemático.

Objetivo 3. Implementar un sistema de adquisición de datos por medio del Arduino Mega 2560, y así conocer el comportamiento de las variables principales del sistema.

Metodología: Se realizó la instrumentación de los sensores, en primer lugar, obteniendo datos de los datasheets respectivos, para lograr que estas señales al llegar al arduino mega tengan como máximo 5v, en el caso de la RTD PT100 se usó el módulo MAX31865 el cual permitió adquirir los datos desde el sensor de temperatura y comunicarlos por protocolo SPI hacia el arduino mega; con el sensor de flujo YF-S201 se realizó una sencilla conexión hacia los pines del arduino mega ya que este se alimenta con 5v DC, su salida a un pin digital y su tierra respectiva; para el sensor de radiación Davis 6450, con alimentación de 3v y al tener un voltaje de salida entre 0 a 3V, nos permitió una fácil conexión hacia el arduino; el sensor de presión SPT25-10-0300A, tiene por salida una señal de 0 a 10V, por lo que realizó adecuación de voltaje para que sea compatible con las entradas analógicas de la tarjeta; un sensor de nivel horizontal SUK177925 con el que se realizó un circuito pull down determinando el nivel de agua presente en el tanque de almacenamiento de agua. Con la implementación de estos sensores se construyó un sistema de adquisición de datos por medio del IDE de Arduino para ser procesados posteriormente en el sistema de control.

Objetivo 4. Desarrollar una estrategia de control tipo Fuzzy para el sistema, que evalúe los datos obtenidos desde los sensores de caudal, radiación solar en el ambiente y temperatura de agua de entrada para aplicar la respuesta más óptima y eficiente según la solicitud de temperatura presente.

Metodología: Se diseñó un controlador que tenga en cuenta el algoritmo tipo fuzzy, y una interfaz en lenguaje Python, que funcione en un ordenador, el cual está conectado con el Arduino Mega por medio de comunicación serial para poder monitorear las variables significativas del sistema en la interfaz; en base a los rangos de trabajo obtenidos anteriormente en cada caso de funcionamiento obrará el controlador.

Objetivo 5. Evaluar el funcionamiento del controlador en el sistema de acuerdo a diferentes condiciones de trabajo.

Metodología: Al implementar el modelo del controlador, se realizó una evaluación del proceso, en el que se hicieron pruebas del sistema trabajando con el compensador que se determinó, para así obtener la respuesta del sistema a diferentes perturbaciones y variables que tengan como finalidad cambiar las condiciones de entrada del sistema y analizar la respuesta que tiene frente a ellas, esto contribuirá a exponer las posibles mejoras que se deben acometer.

Objetivo 6. Divulgar los resultados obtenidos en el desarrollo del proyecto a la comunidad académica.

Metodología: Se expusieron los resultados obtenidos del proyecto a la comunidad universitaria y a los interesados, por medio de canales de divulgación con carácter investigativo que presente el análisis y los logros obtenidos de esta propuesta aplicada al sistema bomba de calor asistido con colector solar, junto con una breve descripción del desarrollo y los beneficios que brinda, así como también, con las conclusiones y recomendaciones que se generaron.

8. Resultados

En esta sección se describen un primer acercamiento a la planta, los resultados teóricos obtenidos a través del modelo matemático, la forma en cómo se diseñaron los circuitos para cada uno de los sensores y como se condensaron en forma de “shield” para Arduino Mega, compatible con Arduino Uno, también están reflejados, así mismo los resultados experimentales para conocer los límites de trabajo de la planta, desde el diseño, simulaciones y por último, pruebas de funcionamiento del controlador que nos permitieron evaluar el desempeño del controlador difuso en cuanto a tiempo de operación hasta alcanzar la temperatura requerida, funcionamiento bajo condiciones óptimas y deficientes de radiación, además de precisión en temperatura deseada.

8.1. Conociendo la planta

Se realizó una prueba de funcionamiento como primer acercamiento a la mecánica del sistema, se tomaron datos en horas puntuales acerca de la temperatura de entrada y de salida del agua, T2 y T3, que describen los puntos de compresión y descompresión del refrigerante en el trabajo del compresor, estos cuatro parámetros por medio de PT100, radiación solar con el medidor SM206, como se muestra en la figura 23, el flujo de agua se trabajó constante a 60 g/s.

Estos procesos son claves, de donde ocurre la transferencia de calor hacia el agua, por medio del colector solar, por radiación incidente y por medio del accionar del compresor, estas pruebas se realizaron el 3 de abril de 2019, para posteriormente llegar a comprender el

comportamiento de las variables en el proceso del calentamiento del agua, así como sus alcances en cuanto a temperatura de salida y tiempos de funcionamiento.

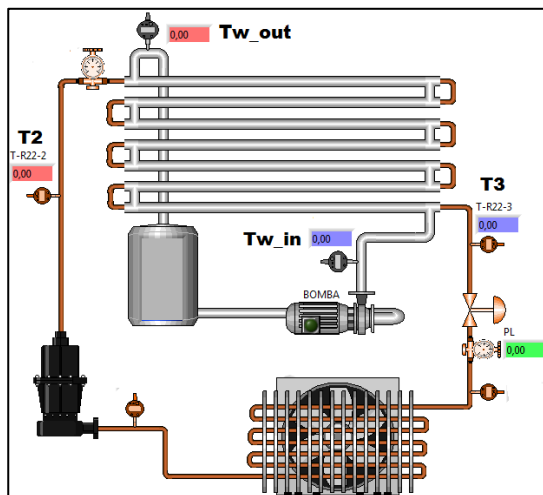


Figura 23. Puntos de medición del sistema.

De los datos recolectados se hizo necesario tomar valores promedios de cada variable; los resultados se pueden observar cuando el compresor estaba apagado (Tabla 1) y cuando el actuador estaba en funcionamiento (Tabla 2).

Tabla 1. Compresor Off.

N	Hora	TW_{in}	R_{solar}	TW_{out}	T_2	T_3	t
1	07:00	30,47	632	31,91	37,36	35,74	498
2	10:00	38,47	1081	43,42	51,56	41,47	662
3	12:30	34,33	1152	41,88	51,08	45,79	85
4	15:00	34,07	90	34,11	39,07	43,11	375
5	17:00	31,74	32	29,54	36,08	36,99	65
6	19:00	30,61	0	27,54	33,66	34,37	1244

Tabla 2. Compresor On.

N	Hora	$T_{w_{in}}$	R_{solar}	$T_{w_{out}}$	T_2	T_3	t
1	07:00	30,66	710	44,04	65,72	41,06	1280
2	10:00	41,18	1090	43,07	76,26	43,47	8615
3	12:30	33,87	1140	58,34	86,6	45,56	1140
4	15:00	33,36	90	46,4	81,62	39,84	1775
5	17:00	31,69	8	33,15	74,33	35,73	2598
6	19:00	30,58	0	43,1	82,72	38,9	1722

Donde:

- $T_{w_{in}}$: Temperatura de entrada del agua ($^{\circ}\text{C}$)
- $T_{w_{out}}$: Temperatura de salida del agua ($^{\circ}\text{C}$)
- R_{solar} : Radiación solar (W/m^2)
- T_2 : Temperatura de refrigerante antes del colector ($^{\circ}\text{C}$)
- T_3 : Temperatura de refrigerante después del colector ($^{\circ}\text{C}$)
- t : tiempo (segundos, s)
- N : Enumeración de datos (adimensional).

8.2. Análisis teórico

En el análisis teórico de la planta, como primer paso fue necesario acudir a la primera ley de la termodinámica aplicada a cambios en la energía interna de sistemas (Smith, Van Ness, & Abbott, 1996) que habla del principio de conservación de la energía, por ello se relaciona la energía interna de un sistema y la energía que se intercambia con el entorno en forma de calor o cuando se realiza un trabajo sobre el sistema, como se ve en la ecuación 3 (Eq. (3)), donde se considera una suma la operación cuando la energía interna en el sistema aumenta o cuando se absorbe el calor del trabajo recibido y una resta en caso contrario.

$$\Delta U = Qc \pm Wc \quad \rightarrow \quad \text{Eq. (3)}$$

Donde:

- ΔU : Variación de energía interna en el sistema (Julios, J).
- Qc : Calor intercambiado por el sistema con su entorno (J).
- Wc : Trabajo intercambiado por el sistema con el entorno (J)

Por tanto, basándonos en la ecuación de variación de energía (Eq. (3)), se inició el proceso haciendo un balance de energía del sistema, donde se pudo determinar que toda la energía que se obtiene por el colector solar y por el compresor son transferidas al agua, y se obtuvo la ecuación 4 (Eq. (4)).

$$Qw = Qsolar + Qcd \quad \rightarrow \quad \text{Eq. (4)}$$

Donde:

- Q_w : Energía en el agua (Watts, W)
- Q_{solar} : Energía del colector solar (W)
- Q_{cd} : Energía del compresor (W)

Teniendo en cuenta que la ecuación para la transferencia de calor a el agua (Struchtrup, 2014) (Michaelides, 2012) depende de la masa que fluye en el sistema, el calor específico del agua (Levenspiel, Engineering Flow and Heat Exchange, 2014) y las diferencias de temperatura que ocurren en la transferencia, como se muestra en la ecuación 5 (Eq. (5)).

$$Q_w = mw * C_{pw} * (T_{w_{out}} - T_{w_{in}}) \rightarrow \text{Eq. (5)}$$

Donde:

- mw : flujo de masa presente, se toma constante de 60 (Kg/s).
- C_{pw} : Calor específico del agua (en 20 °C) de 4.186 (KJ/Kg°C).
- $T_{w_{out}}$: Temperatura de salida. (°C).
- $T_{w_{in}}$: Temperatura de entrada. (°C).

Se tuvo en cuenta la energía que se aporta en forma de calor desde el colector solar calculando la potencia que se recibe por medio de la radiación solar presente multiplicada por el área del colector, como se muestra en la ecuación 6 (Eq. (6)).

$$Q_{solar} = R_{solar} * A_c \quad \rightarrow \quad \text{Eq. (6)}$$

Donde:

- A_c : Área del colector con una constante de 1.6 (m²).
- R_{solar} : Radiación solar. (W/m²)

Al igual como se calculó la energía aportada en forma de calor desde el colector, se debía hacer con la energía aportada del compresor, por tanto, teniendo en cuenta que el fluido que recorre la tubería es el refrigerante R22, y que los cambios de temperatura ocurren desde los puntos de compresión y descompresión del refrigerante, en T2 y T3 respectivamente, cantidad de energía que el sistema absorbe de su entorno en procesos en los que la presión no cambia, el flujo de refrigerante es constante, se describe con las entalpías H2 y H3, reemplazando valores se obtuvo la ecuación 7 (Eq. (7)).

$$Q_{cd} = m_{R22} * (H_2 - H_3) \quad \rightarrow \quad \text{Eq. (7)}$$

Donde:

- m_{R22} : Flujo del refrigerante R22 (Kg/s)
- H2: Entalpia hallada por T_2 (°C)
- H3: Entalpia hallada por T_3 (°C)

Es importante aclarar que el flujo del refrigerante fue constante con un valor de 25 Kg/s cuando está encendido el compresor y 0 Kg/s cuando está apagado, también que las entalpías H2 y H3 fueron calculadas mediante una técnica de regresión desde T_2 y T_3 ; de estos resultados se obtuvieron las ecuaciones 8 (Eq. (8)) y 9 (Eq. (9)):

$$H2 = 416.591 - 0.453618 T_2 + 0.0170735 T_2^2 - 0.000152374 T_2^3 \rightarrow \text{Eq. (8)}$$

$$H3 = 189.465 + 1.51038 T_3 \rightarrow \text{Eq. (9)}$$

Luego, reemplazando las Eq. (5), Eq. (6) y Eq. (7) en Eq. (4) se obtuvo:

$$mw(Tw_{out} - Tw_{in})Cpw = (R_{solar} * Ac) * (mR22(H2 - H3)) \rightarrow \text{Eq. (10)}$$

De la ecuación 10 (Eq. (10)) al despejar la temperatura de salida del agua Tw_{out} , se logró determinar la ecuación 11 (Eq. (11)), que es la representación matemática o modelo estático matemático del comportamiento ideal de la bomba de calor:

$$Tw_{out} = Tw_{in} + \left(\frac{(R_{solar} * Ac) + mR22(H2 - H3)}{mw * Cpw} \right) \rightarrow \text{Eq. (11)}$$

Para analizar de manera visual el proceso, se diseñó un diagrama de bloques del proceso termodinámico que ocurre en el equipo al transferirse la energía térmica del sol y del compresor al agua, diagrama que se observa en la figura 24.

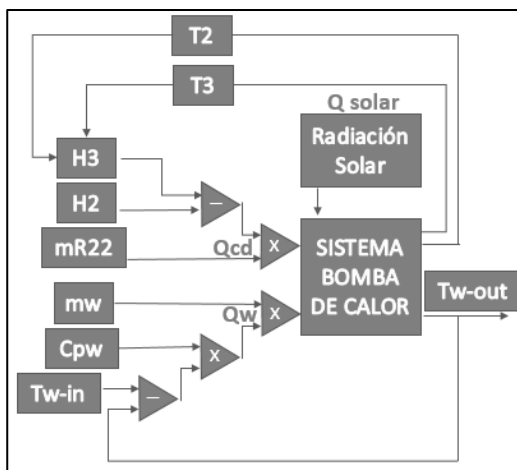


Figura 24. Diagrama de flujo

8.2.1. Superficies de respuesta

Se crearon superficies de respuesta en compresor apagado y encendido con el fin de verificar que el modelo matemático corresponde con los resultados experimentales, las variables de $T_{w_{in}}$, R_{solar} , $H2$ y $H3$ se tomaron desde los datos experimentales para calcular $T_{w_{out}}$ teórica, con el fin de determinar los rangos de operación de la máquina, a continuación se plasma cada una de las gráficas para su interpretación:

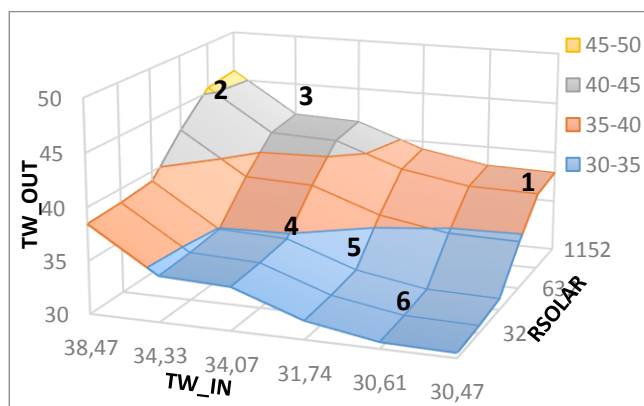


Figura 25. Superficie de respuesta del sistema con el compresor OFF.

Para este caso se tuvo como resultado la superficie de la figura 25, donde se pudo observar que el rango de temperaturas de agua de salida tiene como mínimo entre 30 a 40 °C y como máximo valores entre 40 y 50 °C, también existe una tendencia de aumento de energía cuando incrementa la radiación solar, al igual que con la temperatura de agua de entrada, donde su aumento influye directamente en el crecimiento de la temperatura de agua de salida, a su vez, están los puntos que indican los valores de los resultados experimentales de la tabla 1 según la numeración de la columna N para su comparación.

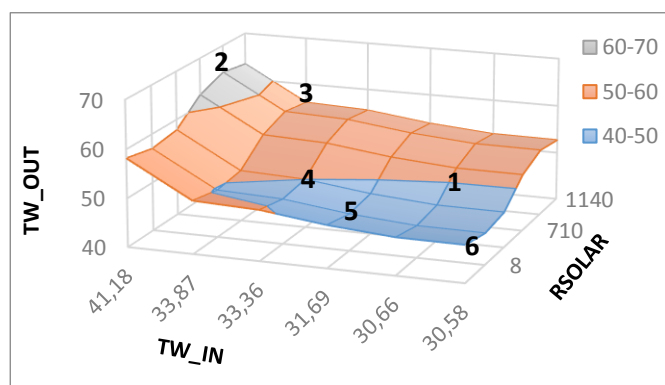


Figura 26. Superficie de respuesta del sistema con el compresor ON.

En este, se obtuvo la superficie de respuesta que se indica en la figura 26, donde se pudo observar que el rango mínimo de temperaturas de agua de salida está entre 40 a 50 °C y como máximo, valores entre 60 y 70 °C; también se indicaron los valores de los resultados experimentales de la tabla 2 según la numeración la columna N. Con esto se logró determinar que existe una correlación entre los valores teóricos y los valores experimentales cuando el compresor está apagado y cuando esta encendido.

8.3. Sensores, actuadores y acondicionamiento de señales

Cada uno de los sensores necesitó ser adaptado para que sus señales se pudieran leer desde el arduino, la programación del microcontrolador Atmel 2560 de la tarjeta embebida Arduino Mega, se realizó por medio del programa IDE Arduino, que incorporó todos los archivos necesarios para subir los archivos al microcontrolador, la programación se realizó en dos etapas, primero se realizó la programación del Arduino como sistema de adquisición de datos, como base se partió de la librería del módulo MAX31865, añadiendo el código necesario para en vez de leer una RTD PT100, como viene el ejemplo de la librería, se pudieran leer 4 al mismo tiempo, posteriormente se añadió la lectura de sensores como el de radiación Davis 6450, la señal de retroalimentación de la electroválvula TNC-02T y el sensor de presión SPT25-100-300A, que son señales analógicas como se mostró anteriormente; a continuación se muestra de manera individual cada conexión:

8.3.1. Conexión de las PT100

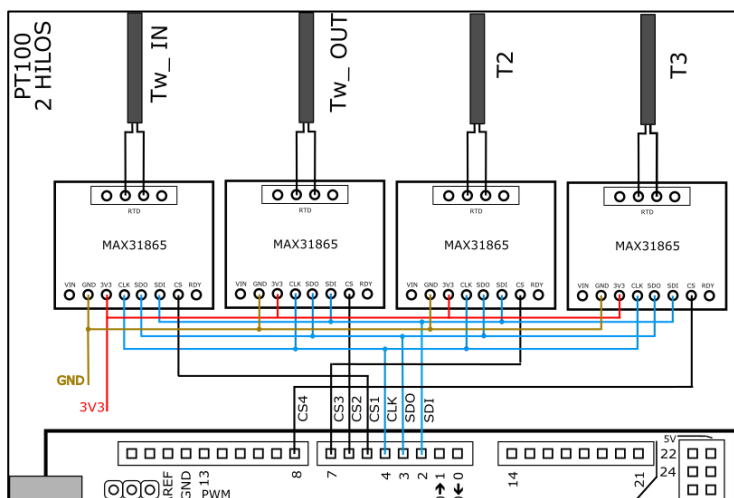


Figura 27. Conexión de las MAX31865 para las PT100

En el caso de la RTD PT100 de dos hilos, se usó un módulo transmisor MAX31865 (Adafruit, s.f.) para cada RTD, conectado en cascada como se aprecia en la figura 27, que permitió obtener las mediciones de temperatura, éste se encargó de realizar la lectura de resistencia del sensor PT100 y convirtió esta señal analógica en un dato digital para ser interpretado por un arduino, el protocolo de comunicación que usa este módulo es de tipo SPI, en la figura también se observa su conexión, los pines usados para la comunicación de datos y alimentación.

8.3.2. Conexión de sensor de presión

El sensor SPT-25-10-0300A en su rango de trabajo de 0 a 300 Psig, nos permitió hacer la lectura de la variable de presión del refrigerante R22 que se usó en el compresor, este sensor tiene una salida de 0 a 10v que para poder ser leída desde el arduino mega fue necesario diseñar un divisor de tensión con dos resistencias de igual valor ($10K\Omega$), que redujo este voltaje a un rango de 0 a 5v, la conexión de este sensor según los colores de los cables es como se muestra en la Figura 28.

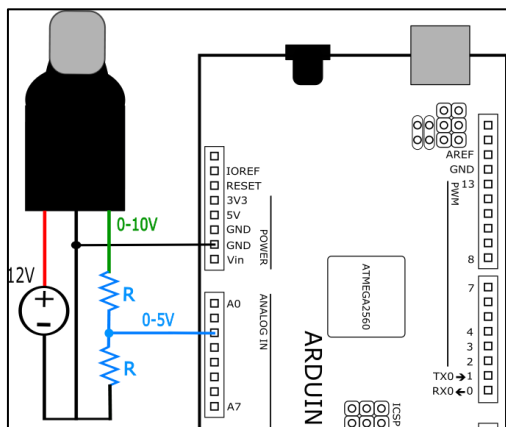


Figura 28. Conexión del sensor de presión.

8.3.3. Conexión de sensor de radiación

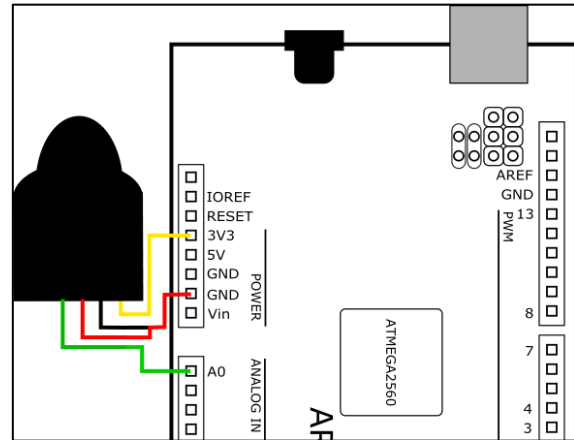


Figura 29. Conexión del sensor de radiación solar.

El sensor de radiación Davis 6450 cuenta con tres cables de conexión: amarillo ($3v \pm 10\%$ -VCC), rojo y negro (tierra) y verde (salida), como primera medida para el sensor de radiación DAVIS se aplicó según hoja de especificaciones $1 W/m^2$ equivale a $1,67 mV$ de lectura y teniendo en cuenta que el sensor se alimenta con $3,3v$ que equivalen a 676 bits en arduino, se calculó el factor a multiplicar a la lectura del sensor obteniendo la ecuación 11 (Eq. (11)). Esta conexión es bastante sencilla porque va directamente a los pines de 3v, GND y A0 del arduino mega como se muestra en la figura 29.

$$R_a = L_{rad} * \left(\frac{V_{rad}}{B_{rad}} \right) * D = L_{rad} * \left(\frac{3,3}{676} \right) * \left(\frac{1}{0,00167} \right) = 2,923 * L_{rad} \quad \rightarrow \quad \text{Eq. (11)}$$

Donde:

- R_a : Radiación solar (W/m^2)
- L_{rad} : Lectura de bits en el arduino desde el sensor (bits)

- V_{rad} : Voltaje de alimentación del sensor de radiación, 3,3 (V)
- B_{rad} : Máxima lectura de bits recibida en arduino por el sensor de radiación, 676 (Bits)
- D : Equivalencia de unidades según datasheet, 1 W/m^2 por cada 1,67 mV.

8.3.4. Conexión de sensor de nivel

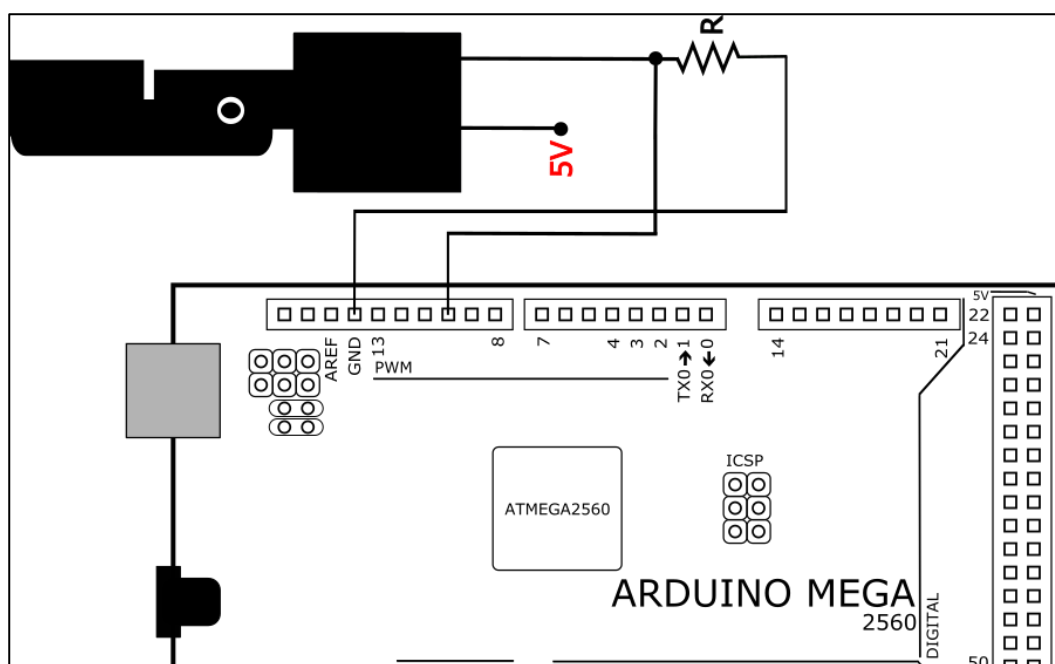


Figura 30. Conexión del sensor de nivel con circuito pull down.

El sensor KU177925 se usó como un indicador de seguridad para evitar que el nivel del agua en el tanque este bajo y asegure que en la motobomba siempre halla agua, para ello se construyó un circuito pull down como el de la figura 30, con una resistencia de 10K Ω , cuando el interruptor se cierra hace que en D10 hallan 5v dando una señal que puede ser interpretada como alto y en lo contrario como bajo.

8.3.5. Conexión de la electroválvula

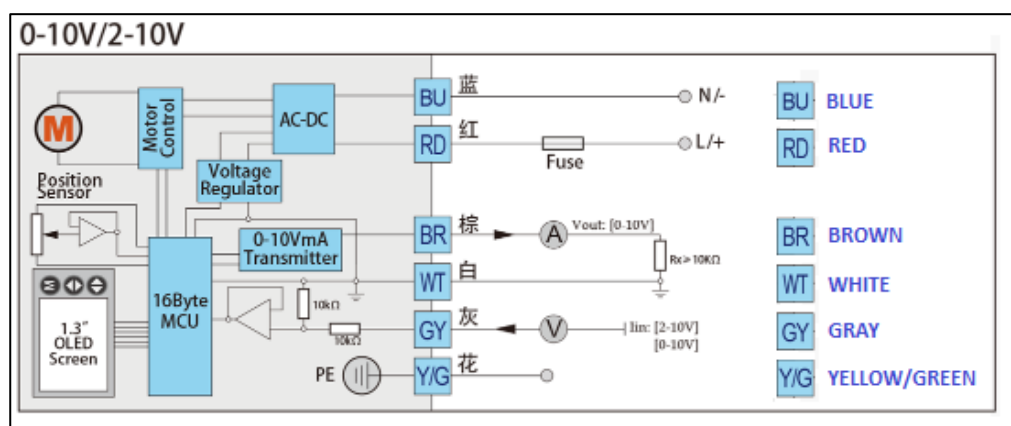


Figura 31. Conexión para una salida de 0 a 10v DC.

Fuente: TCrystal (Electroválvula, s.f.)

Electroválvula TCrystal Serie 02T, con voltaje de tensión nominal AC / DC95-265V se usaron 120v AC como alimentación, método de control de 0-10v de salida. El modo de conexión para esta salida se observa en la Figura 31.

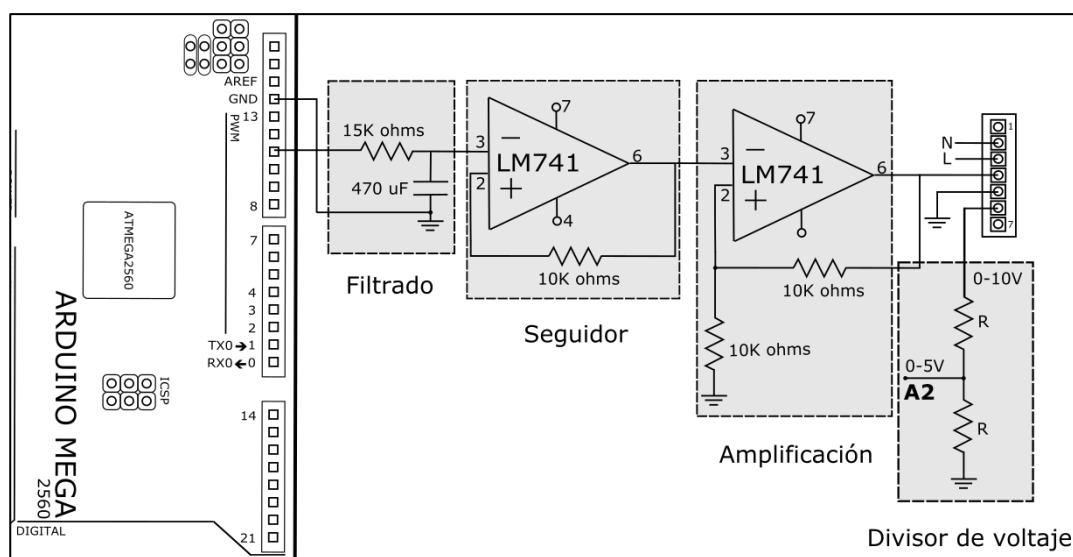


Figura 32. Circuito de control de la electroválvula.

Para lograr el funcionamiento el actuador fue necesario diseñar un circuito de control que permitiera abrir o cerrar la electroválvula por medio de una señal PWM desde el arduino mega, este circuito consta de un filtro RC conectado a un amplificador seguidor con ganancia de 1 en cascada con un amplificador en configuración de no inversor con ganancia de 2, TCN-02T TCrystal nos permite una salida de retroalimentación con rango de 0v a 10v DC que para ser leída por el arduino mega se construyó un divisor de tensión que nos permitió una rango de 0 a 5v DC. La figura 32 nos muestra un acercamiento en los pines de la electroválvula que indica como son las conexiones para su funcionamiento.

8.3.6. Conexión de sensor de flujo

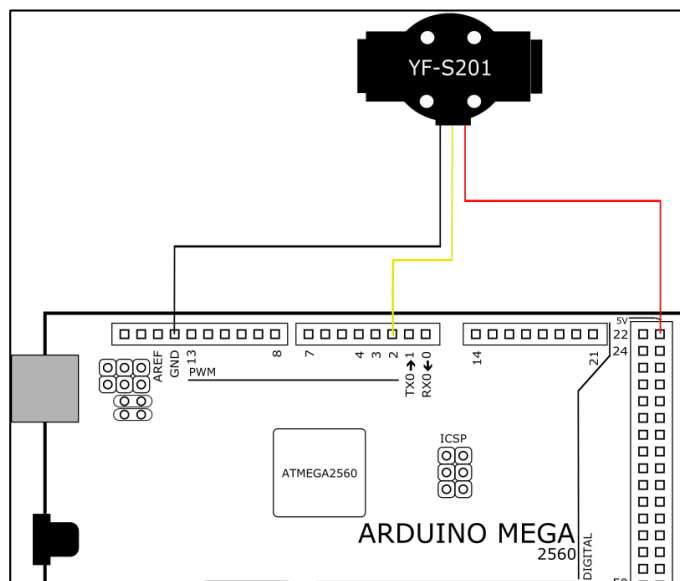


Figura 33. Conexión para sensor de flujo.

El sensor de flujo YF-S201 para tubería de $\frac{1}{2}$ ", ubicado después del actuador de la electroválvula, este sensor de flujo posee tres cables para su conexión: rojo (5v-VCC), negro (tierra) y amarillo (salida de tipo PWM), se conectó como se observa en la figura 33.

8.3.7. Compresor

Para controlar el accionar del compresor, al ser un actuador que funciona de manera convencional, sin ningún tipo de regulación, se trabajó con una salida digital, para aislar y controlar grandes cargas se usó como “puente” un contactor, como se muestra en la figura 34.

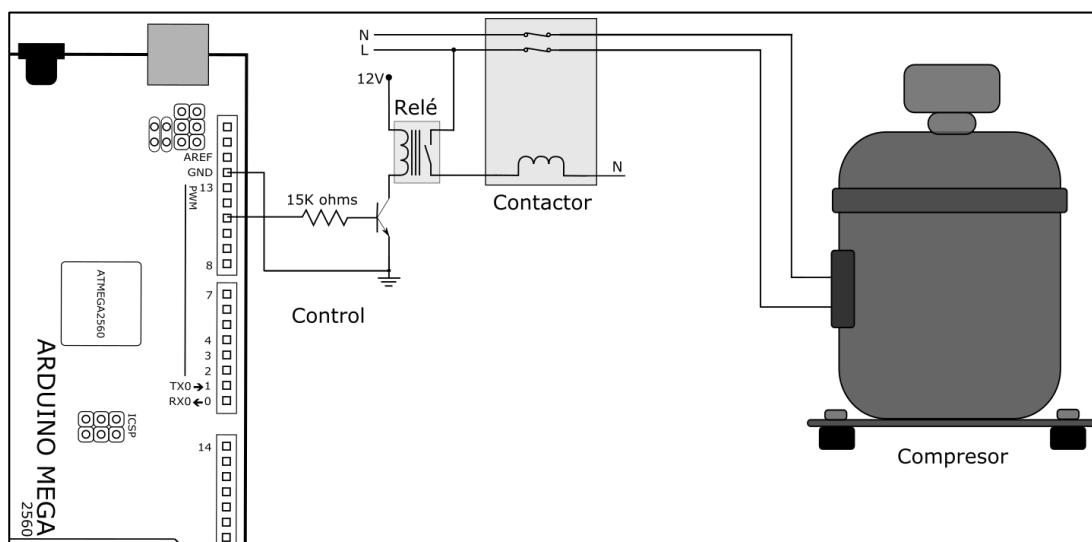


Figura 34. Conexiones para control de compresor desde Arduino.

8.3.8. Construcción de shield para Arduino

Se diseñó la shield para Arduino Mega con una dimensión de 16cm por 8cm, compatible también con placas arduino uno como se ve en la figura 35. La placa cuenta con un circuito a doble cara para comprimir todos los circuitos de adquisición al tamaño mostrado, el tamaño de la placa es evidente si se observa el arduino mega debajo de la shield.

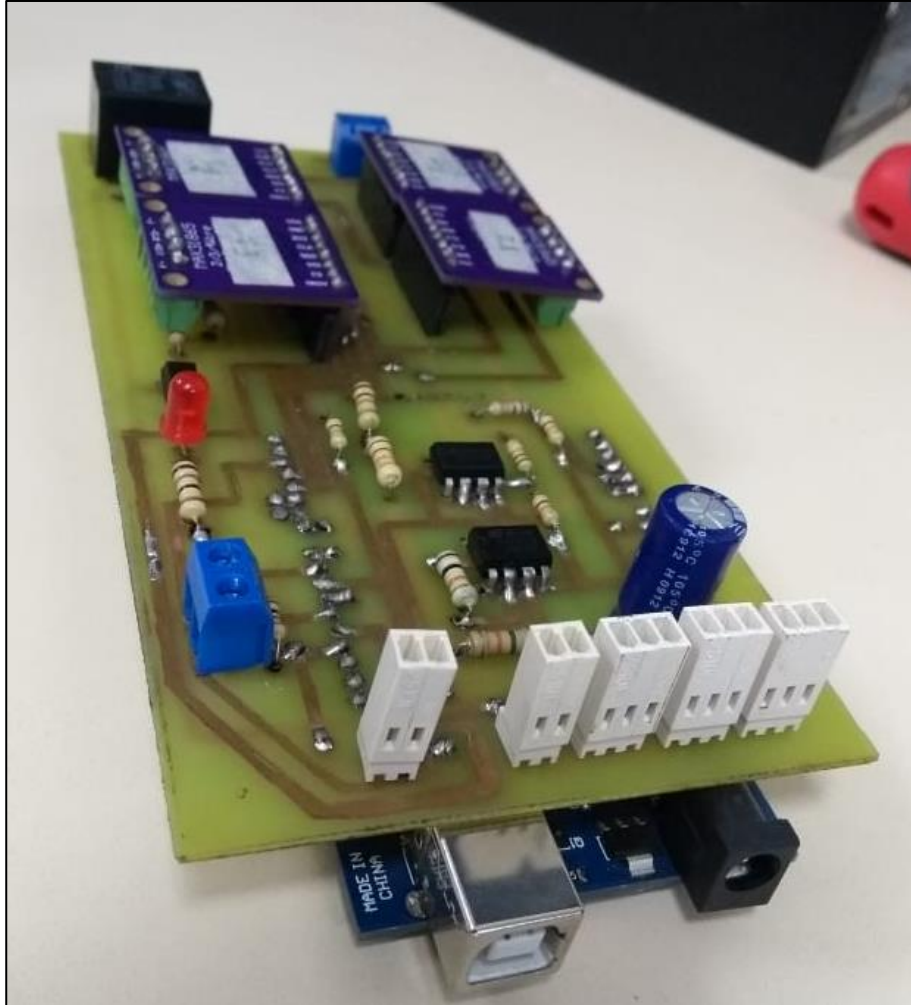


Figura 35. Diseño definitivo de shield para instrumentación y acondicionamiento de sensores.

8.4. Calibración de sensores

8.4.1. Caudalímetro YF-S201 y electroválvula TC02

Para la calibración del sensor de flujo, se graduó el flujo de agua para tener un máximo de aproximadamente 60 g/s, también era indispensable hacer las pruebas en conjunto con la electroválvula para observar la respuesta del sensor a perturbaciones. En la primera prueba de funcionamiento que se puede ver en la figura 36(a), se pudo apreciar la alta dispersión de datos

que genera este tipo de sensor, en la electroválvula, figura 36(b), se ve la retroalimentación para saber la posición de apertura actual.

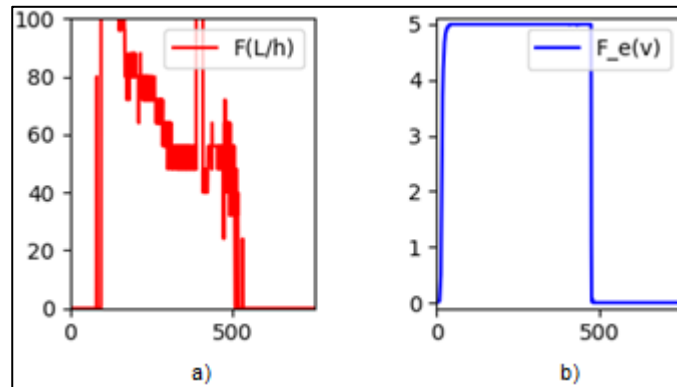


Figura 36. Gráficas en primera prueba de: a) sensor de flujo y b) electroválvula.

Se le aplicó al dato obtenido del sensor de flujo un filtro digital por medio del Exponential Moving Average (Mak, 2003), ecuación 12 (Eq. (12)), en cuanto a memoria solo se necesitó almacenar el valor filtrado anterior, esto supone una gran ventaja computacional frente a otros filtros que requieren guardar N valores y ejecutar cálculos sobre todos ellos, además que se puede observar la acción del filtrado con un retardo de alrededor de 10 segundos, tiempo que en las gráficas no es perceptible.

$$A_n = (\alpha * M) + [(1 - \alpha) * A_{n-1}] \quad \rightarrow \quad \text{Eq. (12)}$$

Donde:

- A_n : Dato a obtener filtrado (Adimensional)
- α : Coeficiente, valor entre 0 y 1 según necesidades (Adimensional)
- M : Dato a filtrar (Adimensional)

- A_{n-1} : Dato que se obtuvo del filtrado anterior (Adimensional)

El cálculo requiere una única instrucción sencilla, que se ajustó a las variables que se usaron, ecuación 13 (Eq. (13)), tomando un α de 0.01, que según las pruebas realizadas daba unos resultados más constantes.

$$S_{ins} = (\alpha * Y) + [(1 - \alpha) * S_{ins-1}] \quad \rightarrow \quad \text{Eq. (13)}$$

Donde:

- S_{ins} : Flujo de agua calculado con el filtro (L/s)
- α : Coeficiente, valor de 0.01 (Adimensional)
- Y : Flujo de agua medido en sensor (L/s)
- S_{ins-1} : Flujo que se obtuvo del filtrado anterior (L/s)

Para la medición del flujo de agua se realizó una caracterización de flujos de agua a diferentes porcentajes de apertura de la electroválvula, empezando en 10%, que es donde el sensor da un valor mayor a cero, como se ve en la Tabla 3, tomando inicialmente datos de apertura de electroválvula requerida, voltaje de retroalimentación de electroválvula, dato obtenido del sensor con el filtro digital y medición experimental del flujo.

Tabla 3. Datos obtenidos del sensor YF-S201 y experimentales

Ap	Vr	S_{ins}	m_e
10	0,53	0,18	17
		0,02	14
12	0,63	0,36	20,4
20	1,03	1,62	37,2
		1,6	37,4
25	1,23	1,8	40,5
		1,78	40,1
30	1,49	1,98	42,2
		1,95	43,8
35	1,74	1,9	44,9
		1,92	45,5
40	2,02	1,9	43,4
		2,07	44,2
45	2,26	2	44,9
		2	44,88
50	2,51	2	44,4
		2,1	45,3
60	3,01	2,15	45,89

Donde:

- Ap : Porcentaje de apertura de electroválvula (%)
- Vr : Voltaje de retroalimentación de electroválvula (V)
- m_e : Flujo de agua medido de manera experimental (g/s)

Se graficaron los datos obtenidos de del sensor vs los datos experimentales de flujo, como se observa en la Figura 37, además, se usó una línea de tendencia en la que se obtuvo la ecuación 14 (Eq. (14)), con un coeficiente determinado R^2 de 0,9881 de acierto con los datos.

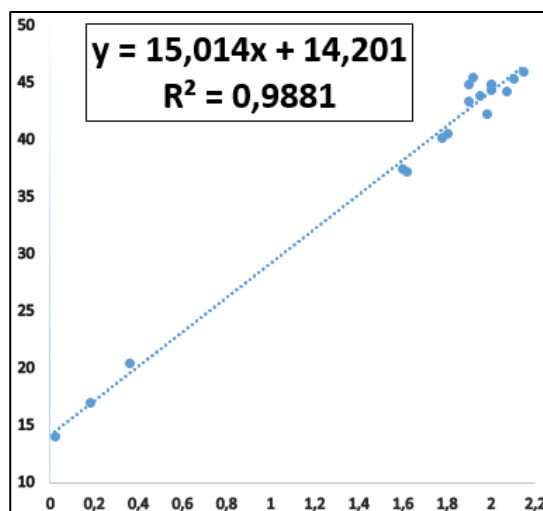


Figura 37. Gráfica de data usada para calibración del sensor de flujo YF201S.

Como se muestra en la figura 37, se obtuvo la ecuación 14 (Eq. (14)), que describe la línea de tendencia de los datos, en la que se puede deducir que el sensor mide valores de flujo superiores a 14,167 g/s.

$$m_{ins} = (15,057 * S_{ins}) + 14,167 \quad \rightarrow \quad \text{Eq. (14)}$$

Donde:

- m_{ins} : Flujo de agua ajustado a datos experimentales (g/s)

Para finalmente, obtener datos del sensor ajustados a los experimentales, mediante la ecuación 14, mostrando una comparativa en la Tabla 4, donde además se tabularon la apertura fijada en la electroválvula, la apertura de la electroválvula según la retroalimentación leída en voltaje, se multiplico por un factor de 20, datos que se ajustaron en un factor de 94% de acierto con el requerimiento de apertura en la electroválvula, flujo de agua leído por el sensor con el

ajuste de la ecuación 14 (Eq. (14)) y el flujo de agua medido de manera experimental, con un acierto de datos entre leídos y experimentales de aproximadamente 97,7%.

Tabla 4.Comparación de datos teóricos con datos experimentales.

Ap	Ap_a	m_{ins}	m_e
10	10,6	16,87726	17
		14,46814	14
12	12,6	19,58752	20,4
20	20,6	38,55934	37,2
		38,2582	37,4
25	24,6	41,2696	40,5
		40,96846	40,1
30	29,8	43,97986	42,2
		43,52815	43,8
35	34,8	42,7753	44,9
		43,07644	45,5
40	40,4	42,7753	43,4
		45,33499	44,2
45	45,2	44,281	44,9
		44,281	44,88
50	50,2	44,281	44,4
		45,7867	45,3
60	60,2	46,53955	45,89

Donde:

- Ap_a : Porcentaje de apertura de electroválvula leído desde arduino (%)

Las ventajas en cuanto a sencillez y eficiencia computacional son evidentes como lo muestra la figura 38(a), en la que los datos llegan a graficarse de manera limpia, sin distorsiones, ni ruido, variando de manera directa con la apertura de la electroválvula, figura 38(b).

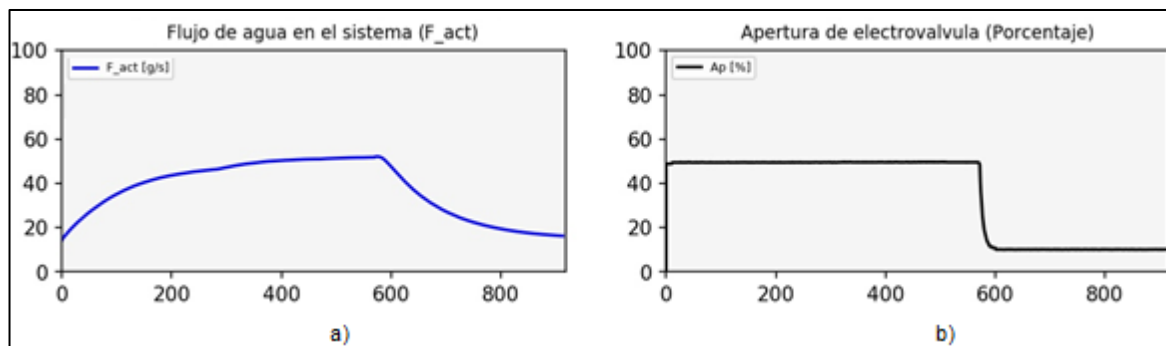


Figura 38. Gráficas con ajuste de datos en prueba de: a) sensor de flujo y b) electroválvula.

8.4.2. Sensor de radiación DAVIS 6450

La calibración del sensor DAVIS se realizó mediante el medidor SM-206, en la que se tomaron datos de ambos sensores para comparar sus respuestas a radiación solar, resultados que se muestran en la tabla 4.

Tabla 5. Datos obtenidos del sensor DAVIS 6450 vs medidor SM-206.

Hora	Sm	Dav
10:40 a. m.	1026	1000
11:00 a. m.	1126	1001
11:20 a. m.	249	194
11:40 a. m.	309	100
12:00 p. m.	333	100,3
12:20 p. m.	1200	1003
12:40 p. m.	362	100,3
01:00 p. m.	152	41,2
01:20 p. m.	172	60,4

01:40 p. m.	136	26,6
02:00 p. m.	1162	850
02:20 p. m.	864	493
02:40 p. m.	316	253
03:00 p. m.	240	150
03:20 p. m.	122	230

Donde:

- Hora: Tiempo en el que se realizó la comparación de datos (Adimensional)
- *Sm*: Radiación solar medida en SM-206 (W/m^2)
- *Dav*: Radiación solar medida en DAVIS 6450 (W/m^2)

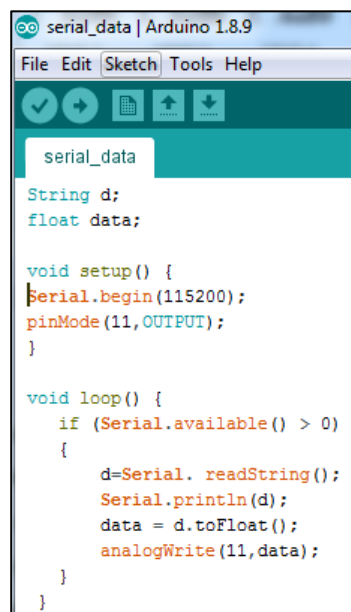
Se puede notar en la tabla 4, que el sensor DAVIS a radiaciones en el caso de las horas 10:40 a.m., 11:00 a.m. y 12:20 p.m., como mayor medida muestra valores aproximados a 1000 W/m^2 , lo que impidió tener un seguimiento completo a la radiación solar incidente en la planta.

8.5. Programación

8.5.1. Arduino

El código para leer datos en el buffer de entrada del microcontrolador, es el que permitió realizar distintas tareas con el arduino, como variar la apertura de la electroválvula, encender o apagar el compresor, cambiar entre modos de uso el arduino; por ello era de suprema

importancia en el desarrollo del proyecto. Después de muchas pruebas, se determinó que la mejor manera de obtener los datos que entran al arduino por serial es almacenarlos en una variable tipo “String”, con ayuda del comando `Serial.readString()` (Arduino, s.f.) cadena de texto, y posteriormente convertir ese dato a “Float”, numérico decimal, por medio de la función `toFloat()` (Arduino, s.f.) en otra variable, ya que si no se realiza este cambio, el buffer no se vacía y pueden quedar residuos de mensajes que afectan un mensaje posterior, en la figura 39, se muestra el código para recepción de datos por puerto serial, en el que posteriormente se convierte el dato a en señal PWM que varía la apertura de la electroválvula.



```
serial_data | Arduino 1.8.9
File Edit Sketch Tools Help
serial_data
String d;
float data;

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  pinMode(11,OUTPUT);
}

void loop() {
  if (Serial.available() > 0)
  {
    d=Serial. readString();
    Serial.println(d);
    data = d.toFloat();
    analogWrite(11,data);
  }
}
```

Figura 39. Código de recepción de datos por puerto serie.

Este código se extendió haciéndose más complejo, se añadió la funcionalidad de enviar datos por serial y separando cada dato por una “,” para hacer más fácil la decodificación en el computador por medio de la interfaz, los datos enviados por serial se encadenan de la siguiente manera: “Dato 1, Dato 2, Dato 3, ..., Dato X”, siendo el “Dato X”, el último dato enviado. En ese momento se contaba con un código para prácticamente el modo manual del proyecto, el

flujograma del funcionamiento de este código se puede ver en la figura 40, donde se puede ver que se inicia el Arduino, se importan las librerías, se crean variables globales, que son las que se comparten entre modos o entre programas internos, en el void Setup se declaran estados iniciales, pines como salidas o entradas, y en el void Loop, que es el programa que se corre continuamente, en el que se necesita enviar los datos de los sensores y revisar el buffer de datos de entrada en espera de información nueva, que se realiza cada segundo.

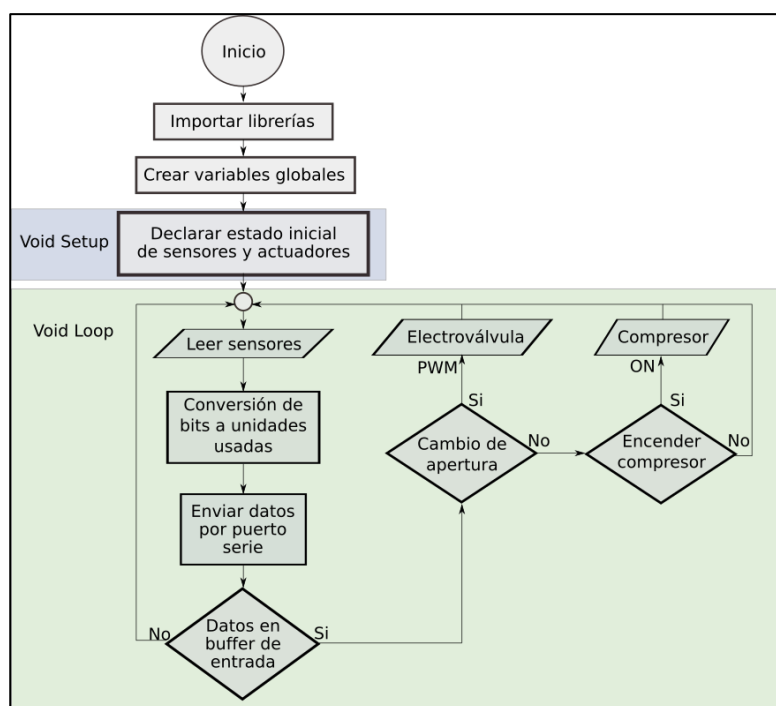


Figura 40. Flujograma que describe el funcionamiento del código para el modo Manual.

8.5.2. Interfaz de usuario

La programación de la interfaz de usuario se hizo de manera secuencial, y en dos etapas, la primera haciendo funcional el modo manual, en el que se lleva el monitoreo en tiempo real de los sensores que se aplicaron al módulo, datos que se van graficando al mismo tiempo

que se muestran en un diagrama de flujo como resumen del estado del proceso interno que se lleva a cabo en el intercambio de energía hacia el agua, esto se realizó en el lenguaje de programación Python 3.6, sobre una ventana creada con ayuda del módulo “tkinter” (Python, s.f.), que cuenta con muchas funcionalidades en materia de creación de interfaz gráfica, como botones, labels, ventanas de diálogo, botones de selección, facilidad para agregar gráficas, que si se le añaden módulos como “PySerial” (Python, s.f.), que facilita la comunicación serial, el módulo “matplotlib” (NumFOCUS, s.f.) que permite la creación, manipulación y actualización de gráficas en tkinter, “datetime” (Python, s.f.) para por ejemplo obtener la hora y la fecha actual, el modulo “sys” (Python, s.f.) que colabora en la identificación del sistema operativo donde corre un script, “pandas” (NumFOCUS, s.f.) que facilita la manipulación de datos, así como su guardado en diferentes tipos de archivos, “numpy” (Numpy, s.f.) que contribuye al manejo de vectores como los que se manejan en las listas, además de matrices, “serial.tools.list_ports” (PySerial, s.f.), que da soluciones para el manejo de aplicaciones con dispositivos conectados al puerto serial y el módulo “gc” (Python, s.f.), conocido como garbage collector, que se encarga de vaciar la memoria y hacer más fluida la ejecución de scripts, en conjunto, se convierten estas herramientas en una solución potente.

El funcionamiento de la interfaz desarrollada se puede ver en el flujograma que se encuentra en la Figura 41, donde podemos ver que el código inicia importando librerías, creando figuras como los logos institucionales y un diagrama de bloques para visualizar el estado de las variables anteriormente mencionado, botones, sliders, que sirven para manipular el modulo que según qué modo de operación se elija se habilitaran o continuaran deshabilitados.

Por ejemplo en el modo manual no se permite manipular el slider de temperatura deseada ni el botón de confirmación de dato, puesto que estos funcionan exclusivamente cuando funciona el controlador, para el modo automático es posible encender o apagar el compresor, ya que de igual manera el controlador según requerimientos y datos actuales de la planta, decide si debe apagarlo o no, en ambos casos de funcionamiento se deberá confirmar la orden por medio del botón “RUN”, para siguiendo con el diagrama de flujo identificar si hay por lo menos un Arduino conectado al puerto serie, en caso de tener una respuesta negativa, se muestra un mensaje de alerta indicando que no se encuentra conectada la tarjeta, en caso contrario, se identifica si el sketch o programa en el Arduino es el correcto, en caso que no sea así, se muestra un mensaje indicando que el Arduino contiene un sketch que no corresponde con el usado para la planta, si se tiene una respuesta afirmativa se empieza con la lectura y decodificación de datos de sensores.

Los datos que se actualizan en cada label en el diagrama de bloques y los labels que indican la temperatura actual en cada gráfica, se empiezan a generar las gráficas, y en caso de agregar una perturbación al sistema, se envían los datos por comunicación serial al Arduino, en caso de pérdida de conexión entre Arduino-Ordenador, se da por terminada la sesión y se generan los archivos tipo “.csv” y “.xlsx” con los datos obtenidos de la sesión de trabajo, además de generar imágenes con formato “.png” con las gráficas generadas, acciones que ocurren de igual manera en caso de presionar el botón “STOP”, cabe resaltar que al terminar una sesión, por código se cierra la comunicación serial, se vacían las listas y se limpian las gráficas, esperando una nueva orden desde la selección de modo; es importante aclarar que mientras una sesión se

encuentra activa no se puede cambiar de modo, para esto es obligatorio detener el modo desde el botón “STOP”, hacer el cambio e iniciar el modo desde “RUN”.

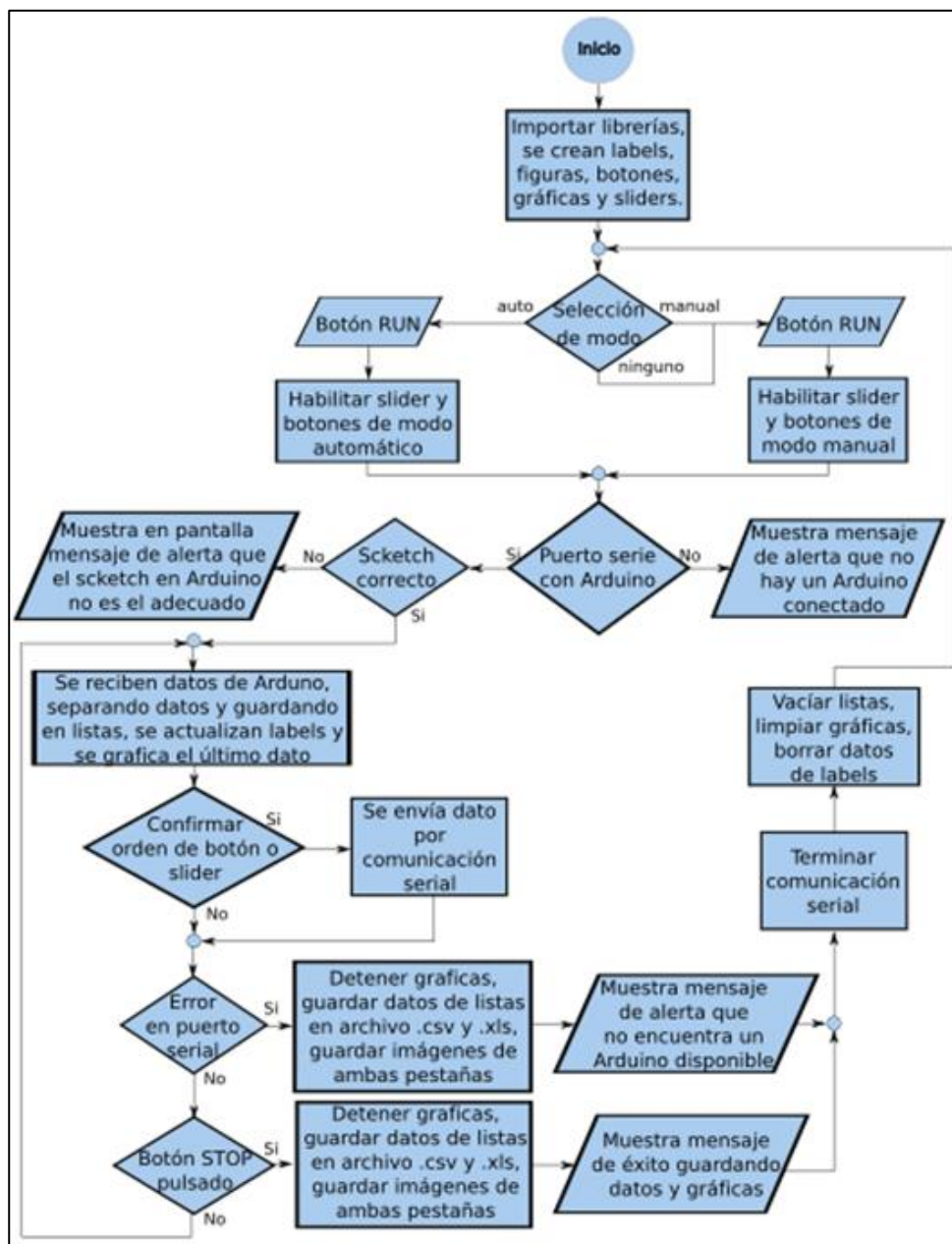


Figura 41. Flujograma que describe el funcionamiento del código para la interfaz.

El resultado de la interfaz se puede ver en la figura 42, donde se muestra la pestaña principal, y la pestaña secundaria en la figura 43, funcionando en un sistema operativo Windows.

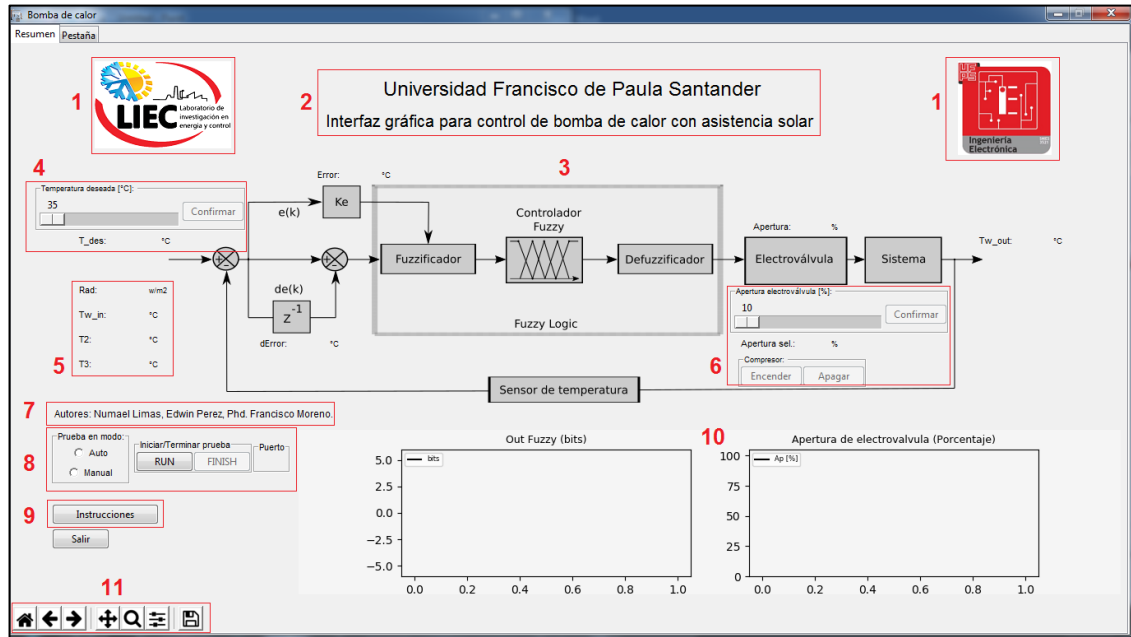


Figura 42. Zonas de interés en la pestaña principal de la interfaz de usuario.

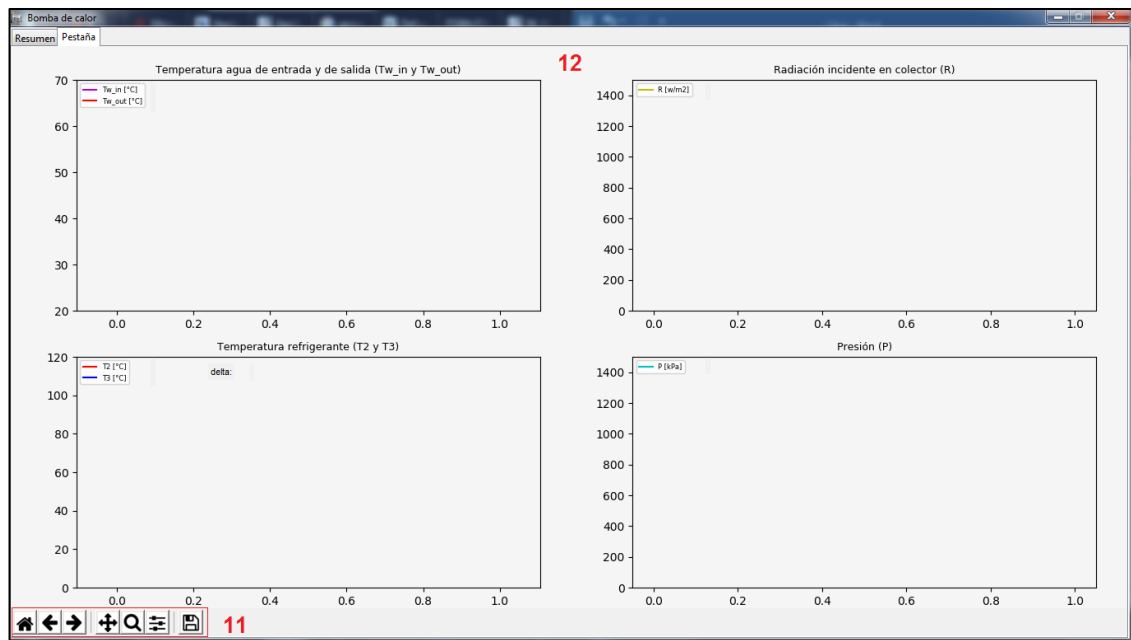


Figura 43. Pestaña secundaria de la interfaz de usuario.

A continuación, se presenta la identificación de las partes que componen la interfaz, como se puede observar en la Figura 42 y 43, se delimito con rectángulos en rojo algunas zonas y se enumeraron.

1. Identidad corporativa: se encuentran los logos del LIEC (Laboratorio de Instrumentación Electrónica y Control LE206) y el logo del programa Ingeniería Electrónica.
2. Encabezado y título: aquí se encuentra el nombre de la universidad, Universidad Francisco de Paula Santander y un título para la interfaz “Interfaz gráfica para control de bomba de calor con asistencia solar”.
3. Diagrama de flujo interactivo: se decidió incluir este diagrama de flujo que funciona de manera interactivo que varía en tiempo real las medidas en cada sensor o el valor del proceso que se realiza en caso del Error y delta error (Controlador).
4. Zona de modo automática: esta zona es exclusiva para el funcionamiento del modo automático en la interfaz, en donde se puede elegir un valor de temperatura deseada de agua en el slider, valores entre entre 35 y 60 °C, confirmando el dato en el botón homónimo.
5. Zona de variables de entrada: Se encuentran las variables de entrada de la plata, como las medidas de radiación, temperatura de agua de entrada, temperaturas T2 y T3.
6. Zona de modo manual: esta zona es exclusiva para el funcionamiento del modo manual en la interfaz, en donde se puede elegir un valor de apertura de

electroválvula en el slider entre 10 y 100 %, confirmando el dato en el botón homónimo, dato que se establecerá en el label justo en el inferior, además de manipular el encendido y apagado del compresor.

7. Autores: Se mencionan los autores del desarrollo de la interfaz y del proyecto.
8. Elección para sesión: en esta zona se elige el modo de funcionamiento de la interfaz, modo automático o manual, además de Iniciar o Terminar una sesión de prueba, adicionalmente se identifica el puerto en el que se tiene conectado el Arduino.
9. Instrucciones: Este botón despliega el instructivo para el manejo de la interfaz.
10. Zona de gráficas controlador: Esta zona está dedicada a ver en la parte izquierda la acción de control que se ejecuta en el Arduino para alcanzar el setpoint dado, teniendo en cuenta que el controlador actúa según su tiempo de muestreo, en la parte derecha se puede observar cómo afecta la acción de control a su elemento actuador, la electroválvula, en su variación de porcentaje de apertura.
11. Ajustes de gráficas: un navegador para personalizar la visualización en tiempo real las gráficas, en parámetros como acercamiento a zonas específicas de gráficas o análisis en un rango de tiempo específico.

Para la segunda pestaña, figura 43, además de las zonas mencionadas se cuenta con el número 12, que corresponde a las gráficas de las variables de entrada en el sistema antes mencionadas, además de la gráfica de presión en el refrigerante R22 en el compresor.

8.6.Pruebas de funcionamiento de la planta

8.6.1. Pruebas en compresión y corrección de fugas en tubería de cobre

Estas pruebas se realizaron con el objetivo de comprobar el correcto funcionamiento de la bomba de calor, las temperaturas límite que alcanza la planta cuando se encuentra en funcionamiento el compresor, así como la verificación de gas refrigerante R22 en la tubería de cobre para el correcto funcionamiento, también para conocer parámetros de funcionamiento límites con dependencia de la transferencia de energía al agua por medio del colector solar.

8.6.1.1.Primer prueba de funcionamiento de la planta con compresor On y bajo techo 5 de noviembre de 2019 17:50 horas

En la primera prueba que se realizó, se inició con la apertura de la electroválvula en 50%, teniendo un flujo de agua máximo de aproximadamente 50 g/s, como se puede ver en la figura 44(a), donde a razón de no obtener cambios en la temperatura de agua de salida se procede a disminuir al mínimo, 10%, la apertura de la electroválvula, figura 44(b) para disminuir el flujo de agua y lograr la máxima transferencia de calor.

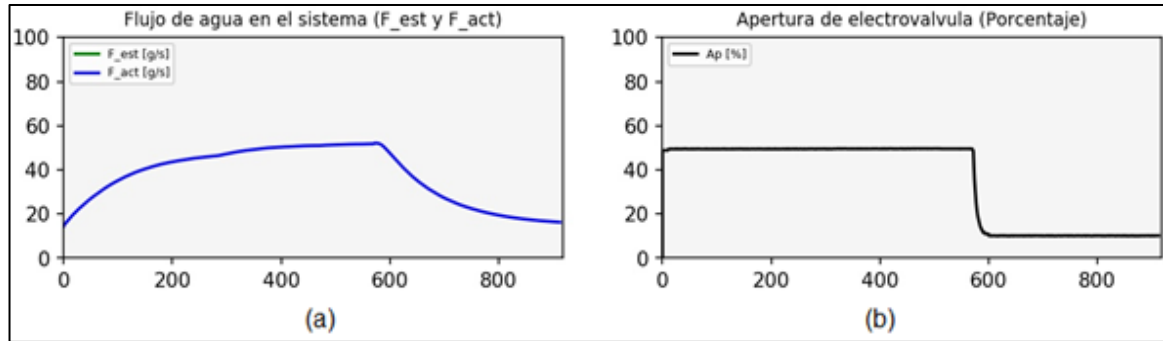


Figura 44. Comportamiento del flujo de agua respecto al cambio de apertura en la electroválvula.

Al tener el mínimo de apertura en la electroválvula, se esperaba tener un aumento visible en la temperatura de salida del agua que se visualiza en color rojo en la figura 45, y la temperatura de entrada del agua en color morado, resultado de la variación de la apertura no se apreció, la temperatura del agua de entrada se debe a que el agua se está recirculando desde el tanque de almacenamiento en la planta, por ello se encuentra a temperatura ambiente.

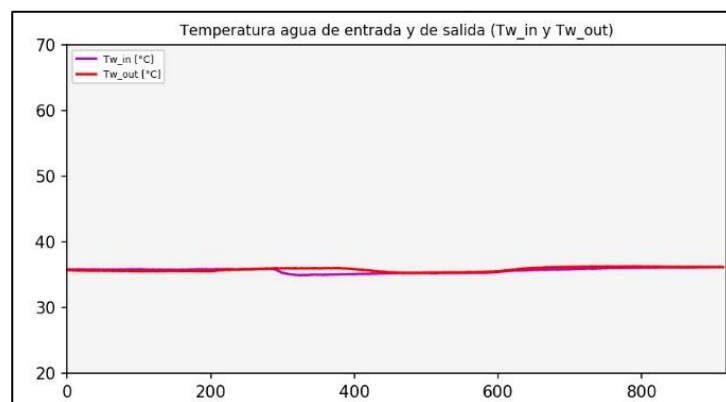


Figura 45. Temperatura de salida y de entrada en la planta.

Se observan, además como resultado de la primera prueba el comportamiento de las temperaturas en la compresión, T2, y descompresión del gas refrigerante, T3, de donde se pretende aprovechar la alta temperatura y transferir lo máximo posible de calor al agua, aunque

se alcanza una temperatura de 80 °C, donde no se logró la transferencia en el agua de salida en la planta para este flujo de aproximadamente 50 g/s como se observa en la figura 46.

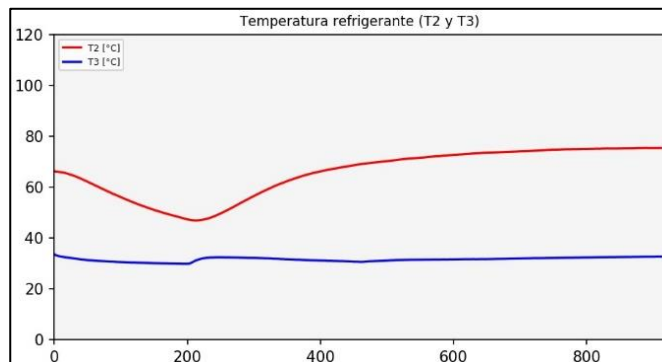


Figura 46. Temperaturas de compresión y descompresión del refrigerante en la planta.

La planta solo dispuso del compresor como fuente de energía para esta prueba, en la figura 47 se aprecia la presión de trabajo que se tuvo en la tubería de cobre que sale del compresor, donde al cabo de 200 segundos se pone en marcha el compresor y se apreció una caída pronunciada en la presión del refrigerante, lo cual fue un claro indicio de la presencia de una fuga de gas en el sistema.

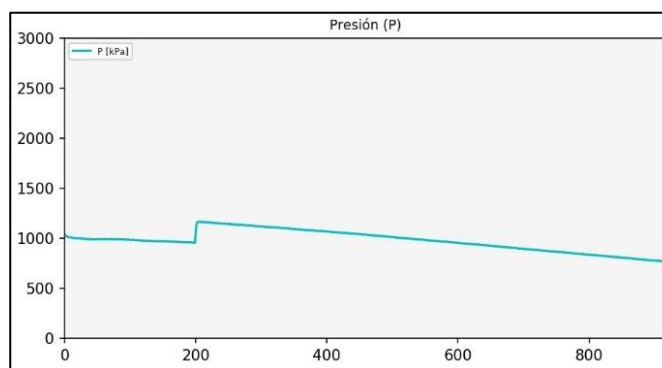


Figura 47. Presión en el sistema donde se observa la caída en la presión del refrigerante.

8.6.1.2. Corrección de fuga presente en la tubería

El día 6 de noviembre de 2019 a las 10:42 horas al monitorear las variables se confirmó la fuga en el sistema al no tener presencia de presión en la tubería de cobre, como se observa figura 48, por tanto, se dispuso a buscar y corregir el escape de refrigerante.

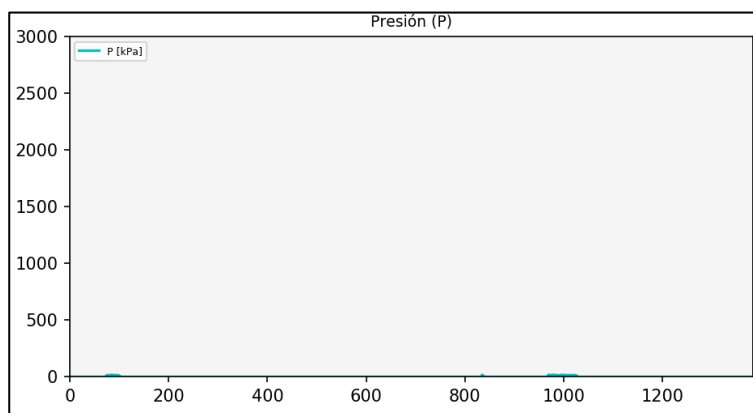


Figura 48. Las tuberías sin presión.

8.6.1.3. Prueba de presión en el sistema posterior a la corrección de fugas

El día 6 de noviembre de 2019 se realizaron correcciones de fugas que se encontraron en los puntos de medición de temperatura del refrigerante por medio de las PT100, T2 y T3, luego se ejecutaron dos pruebas de presión inyectando aire al sistema y verificando el comportamiento de la presión, que no tuviera caídas para descartar fugas. La primera prueba se efectuó a las 11:26 horas como se puede ver en la figura 49, se le inyectó aire al sistema por medio de un compresor, se analizó el comportamiento de la gráfica de presión con el objetivo de visualizar si persistían las fugas, en la que no se detectan caídas pronunciadas de presión.

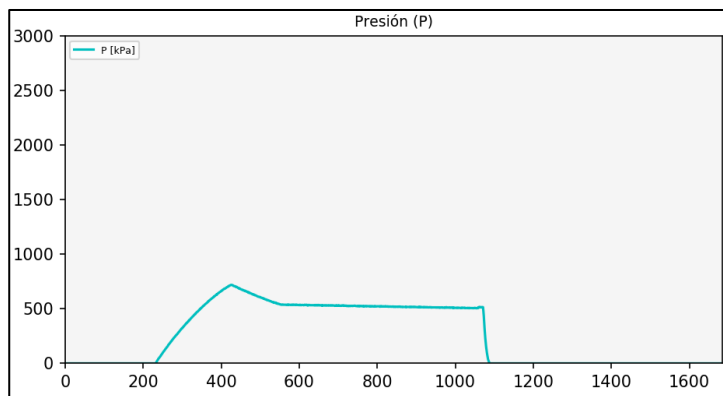


Figura 49. Primera prueba de presurización con aire seco en la planta.

La segunda prueba de presión se realizó a las 14:47 horas, como se ve en la figura 50, en donde se descartó la presencia de fugas y se procedió a cargar de refrigerante el equipo.

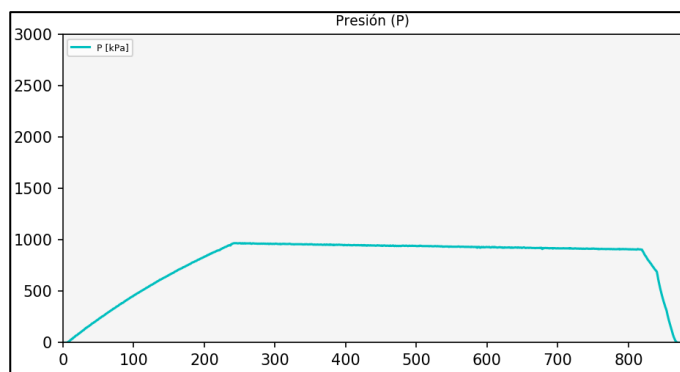


Figura 50. Presión de aire seco en la planta en la segunda prueba.

8.6.1.4. Carga de refrigerante

El día 7 de noviembre de 2019, 18:27 horas se realizó una última prueba de presión para descartar cualquier indicio de fugas, esto se puede observar entre hasta 1000 segundo en la figura 51, donde se obtiene una gráfica de presión ideal y se procedió a la carga de refrigerante, que se aprecia después de los 1000 segundos en la figura 51, cargando el refrigerante hasta 1500

KPa, y al desconectar la válvula de carga se cae un poco la presión hasta alrededor de 1200 KPa, que es lo recomendado para el compresor que se empleó.

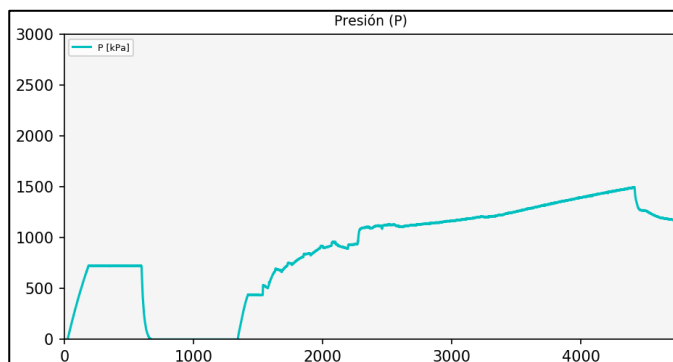


Figura 51. Prueba de presión y carga de refrigerante en la planta.

Como anteriormente se mencionó respecto a la figura 45, donde no se obtuvo una transferencia de calor al agua, se decidió disminuir el flujo de agua hasta 15 g/s con el mínimo de apertura en la electroválvula como se observa en la figura 52, donde se aprecia la variación de flujo dependiendo de la variación que se le aplique a la electroválvula.

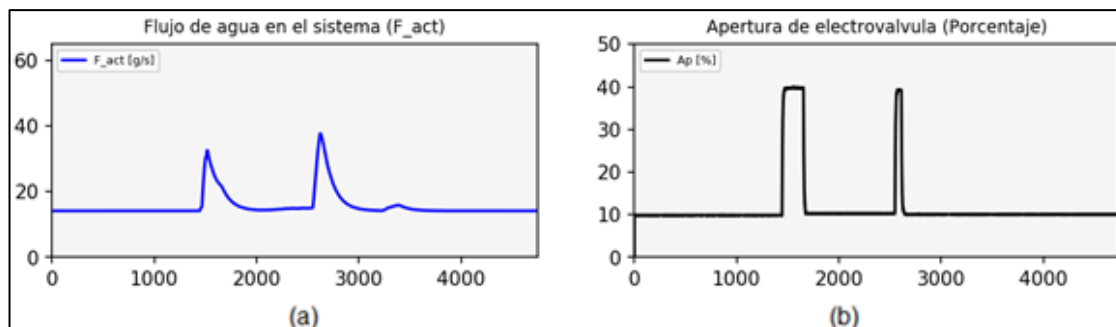


Figura 52. Gráficas de: a) flujo de agua en el sistema y b) apertura de electroválvula.

La disminución de flujo se realizó para aumentar la temperatura en el agua de salida de la planta al momento de cargar el refrigerante, acción que se vio reflejada, como se observa en la

figura 53, donde la temperatura del agua de salida alcanza los 50 °C, y aumenta al mismo tiempo que lo hace la carga de refrigerante como se ve en la figura 51.

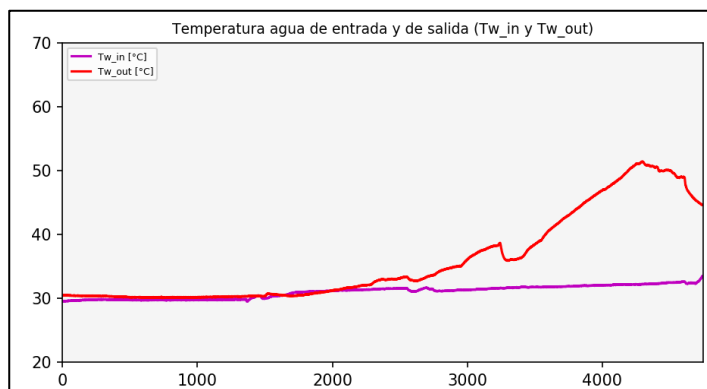


Figura 53. Temperaturas de agua de entrada y de salida en carga de refrigerante.

La temperatura de salida de agua en la planta se ve afectada como se ha comentado anteriormente y reflejado en las ecuaciones 8 (Eq. 8) y 9 (Eq. 9), por las temperaturas T2 y T3, en la carga de refrigerante se puede observar en la figura 54 que la temperatura T2 alcanza aproximadamente 100 °C y la temperatura T3 aproximadamente 35 °C en la carga de refrigerante.

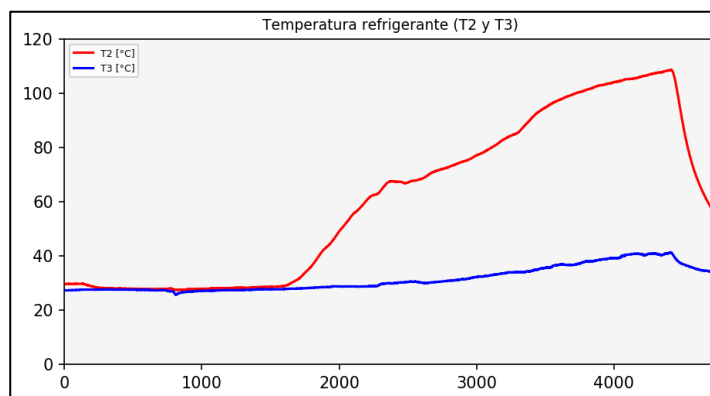


Figura 54. Temperaturas de compresión y descompresión del refrigerante durante la carga.

8.6.1.5. Pruebas de funcionamiento sensor de flujo

Se realizaron pruebas para verificar el correcto funcionamiento del sensor de flujo por motivo de los resultados que se observaron en la figura 52, donde la gráfica de flujo de agua se encontraba es su mínimo admisible, aunque se registraban en el flujo los cambios en la apertura de la electroválvula. Se realizaron dos pruebas para 10% y 20% de apertura en la electroválvula en la que solo se observaron los flujos respectivos obtenidos por el sensor, al tener que modificar el flujo máximo estimado en el sistema de 60 g/s, se estableció tener un máximo de 15 g/s de flujo. El día 8 de noviembre de 2019 a las 16:38 horas se realizó la prueba con el 10% de apertura en electroválvula que se observa en la figura 55(b), el sensor de flujo nos marcó el valor mínimo posible como se ve en la figura 55(a), que según la calibración que se obtuvo del sensor en la ecuación 14 (Eq. 14) es de 14,167 g/s, lo que confirma que el flujo esta fuera del rango de medición del instrumento.

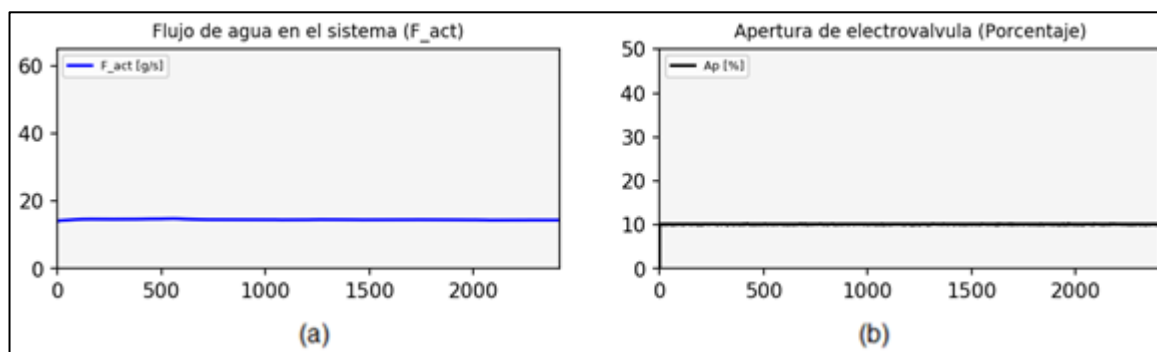


Figura 55. Gráficas de: a) flujo de agua en la planta y b) apertura en electroválvula en 10%.

El día 8 de noviembre de 2019 a las 18:22 horas en el 40% de apertura en electroválvula que se observa en la figura 56(b), el flujo tuvo fluctuaciones que alcanzaron los 25

g/s como se ve en la figura 56(a) estos registros de datos no aportan información fiable por la oscilación.

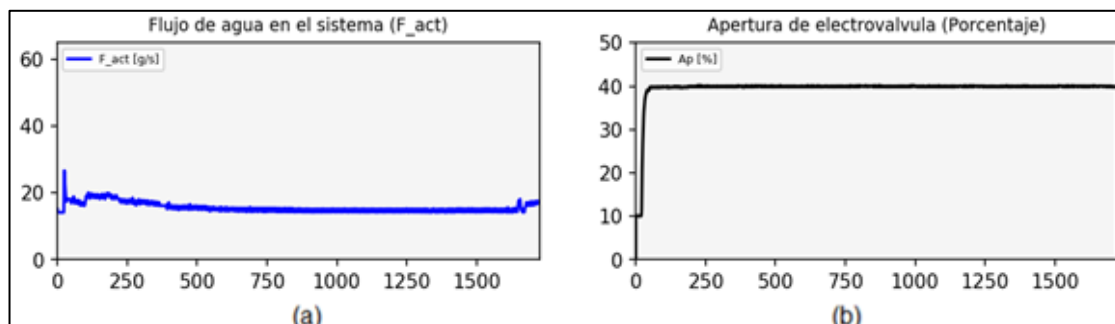


Figura 56. Gráficas de: a) flujo de agua en la planta y b) apertura en electroválvula en 40%.

En las pruebas que se realizadas se ignoraron los resultados obtenidos del sensor de flujo por motivo de deficiencias en su rango de medición en flujos inferiores a 20 g/s, y ante la nula radiación se ignoró su gráfica.

8.7. Caracterización del sistema

8.7.1. Caracterización del sistema bajo sombra

Se realizó la caracterización del sistema para conocer el rango de temperaturas de trabajo para la electroválvula en los valores de: 10%, el día 13 de noviembre de 2019 iniciando la prueba a las 10:37 horas; 50%, el día 13 de noviembre de 2019 iniciando la prueba a las 12:35 horas; y 100%, el día 13 de noviembre de 2019 iniciando la prueba a las 11:24 horas, además de las temperaturas alcanzadas con el trabajo del compresor bajo sombra, es decir sin ayuda de la radiación solar, solo aplicando el encendido del compresor, por tanto, se inició la interfaz en

“modo manual”, también es importante resaltar que el agua de entrada se tomó desde una llave de paso para así, tener una temperatura de entrada más baja y analizar la diferencia de temperatura de entrada de agua con la de salida.

La figura 57 nos muestra el comportamiento de la temperatura de salida del agua, alcanzando un estado estable en sus máximo valores dependiendo del porcentaje de apertura de la electroválvula; para 10% se alcanzó valores aproximados a 42°C, para 50% temperaturas cercanas a 35°C y para 100% valores alrededor de los 34°C.

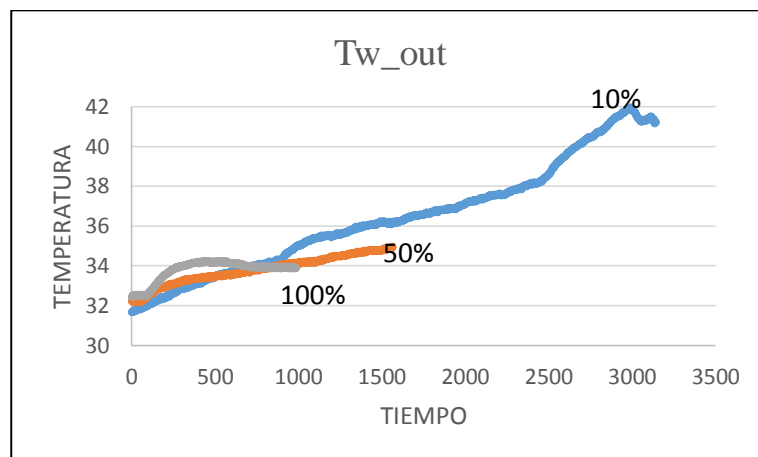


Figura 57. Grafica de la temperatura de salida en compresor ON

El delta de temperatura representado en la figura 58, se realizó entre la temperatura de entrada y salida del agua, con el fin de apreciar la energía térmica que se le ha aplicado al agua proveniente del compresor, dependiendo de la apertura de la electroválvula, donde se observó que con 10% la cantidad de energía térmica transferida fue mayor después de 1500 segundos.

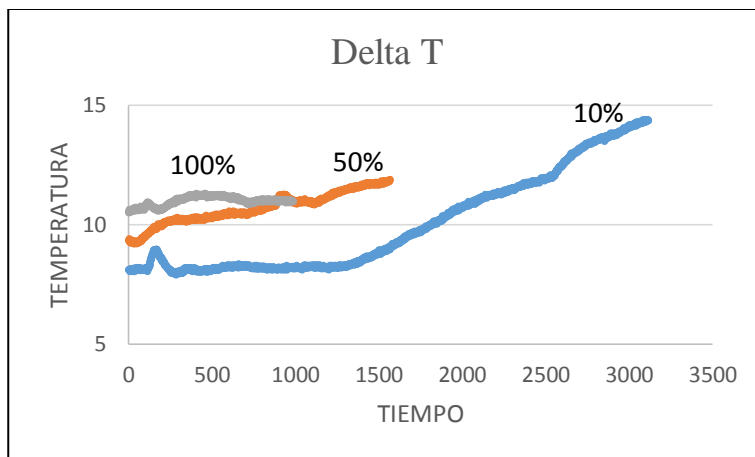


Figura 58. Grafica del delta de temperatura en compresor ON

La grafica de la figura 59 representa el comportamiento que tuvo el refrigerante R22 después de salir del compresor durante la prueba, es decir T2, allí se observó que con un porcentaje de apertura bajo tardo más en conseguir valores máximos de temperaturas, pero con este porcentaje se logró en su estado estable, la máxima temperatura en T2, a diferencia de los demás.

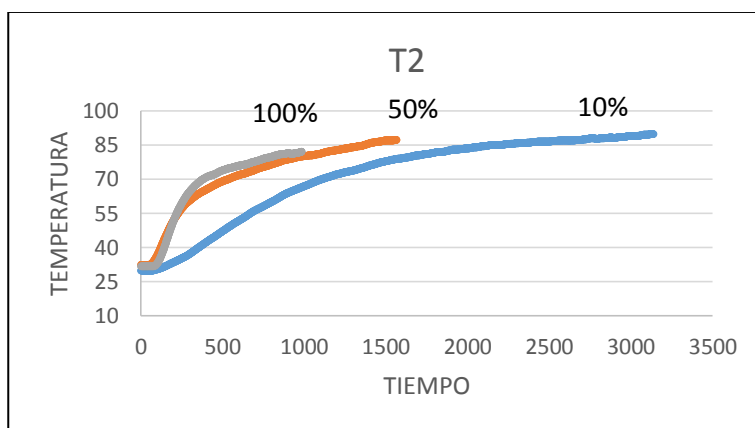


Figura 59. Grafica de la temperatura T2

T3 en la figura 60, variable medida en la entrada del compresor que nos permitió ver el comportamiento de la temperatura del gas, este dato es bastante importante, ya que, nos dice que el R22 no está comprimido y que el compresor está en reposo para realizar una nueva prueba, a

su vez la gráfica nos mostró una estabilidad de 32°C de temperatura promedio, haciendo este valor independiente del porcentaje de apertura.

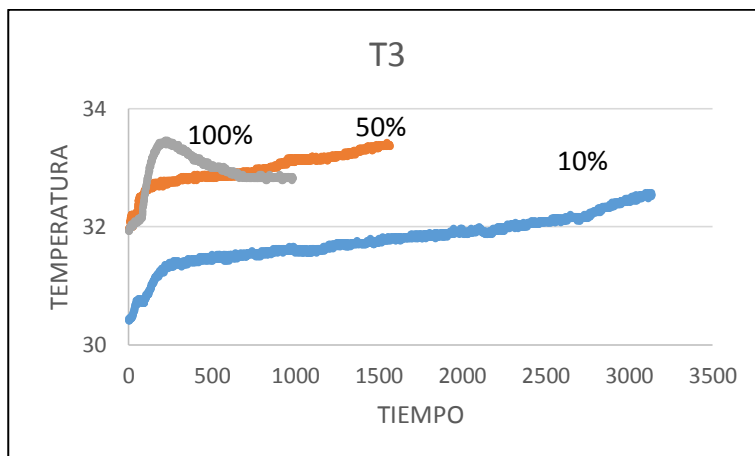


Figura 60. Grafica comparativa de la temperatura T3.

La presión alcanzada en cada prueba hecha con sus diferentes porcentajes de apertura se estabilizó en un valor promedio de 1000KPa, que constató el buen funcionamiento del compresor, el cual no tuvo fugas de gas, además en los porcentajes de cada prueba se observó un comportamiento estable como se observa en la figura 61.

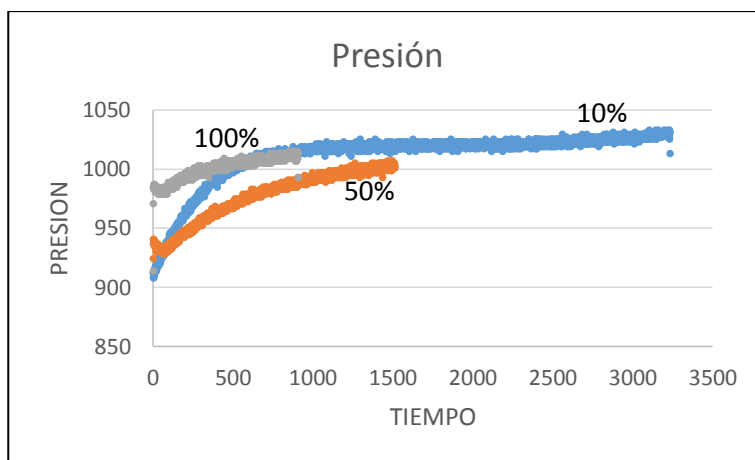


Figura 61. Grafica de la presión del refrigerante dentro de la tubería de cobre con el compresor en funcionamiento.

La ecuación (4) en el apartado de resultados teóricos nos permitió conocer que al no haber energía solar presente en la prueba, la única energía que se transmite al agua es la proveniente del compresor, es decir Q_{cd} es igual a Q_w , entonces la ecuación (5) es quien nos proporcionó la información necesaria para la gráfica Q_w de la figura 62, donde se observó que hay mayor energía cuando tenemos 100% de apertura de la electroválvula y menor en 10%, lo que hizo pensar que era incongruente este comportamiento, ya que, se lograron temperaturas altas con un porcentaje de apertura bajo, como lo indica la gráfica T_{wout} . Se identificó también que el factor causante de este comportamiento era el caudal presente en cada porcentaje de apertura, pero también se registró un aumento de energía después de 1500 segundos en 10% de apertura, lo que permitió corroborar el delta de temperaturas, como se observó en la figura 62 y así alcanzar valores máximos en la temperatura de salida del agua.

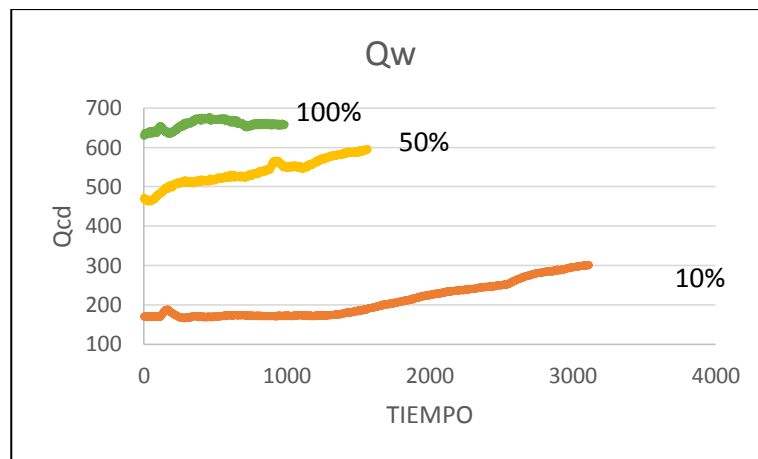


Figura 62. Gráfica del Q_w sin controlador

El rendimiento de la máquina se obtuvo con la ecuación (15):

$$COP = \frac{Q_w}{W} \rightarrow \text{Eq. (15)}$$

Donde W era la potencia tomada en cada porcentaje de apertura de la electroválvula.

Tabla 6. Potencia en el Compresor

PORCENTAJE DE APERTURA	CORRIENTE (A)	VOLTAJE (V)	POTENCIA (W)
100 %	4.8	120	576
50 %	4.9	120	588
10 %	4.7	120	564

Teniendo en cuenta los datos de potencia de la tabla 3 y reemplazados en la ecuación (15) se observa en la gráfica COP de la figura 63, la cual presentó un comportamiento similar a la gráfica de Q_w .

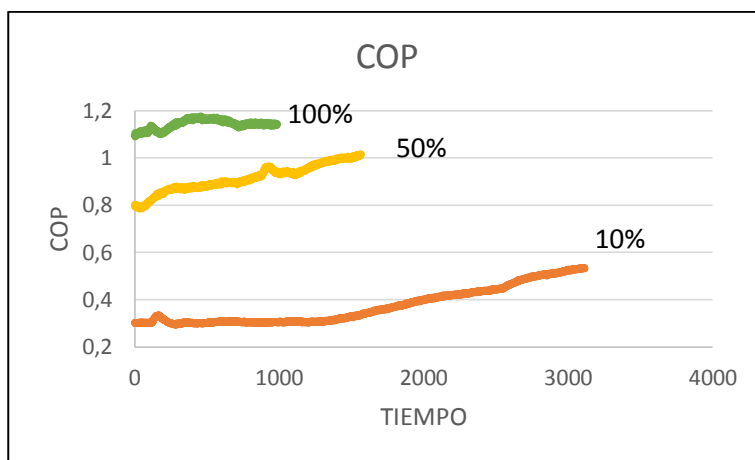


Figura 63. Grafica del COP sin controlador

8.7.2. Caracterización del sistema con radiación solar presente

Para las pruebas realizadas con compresor apagado, con el fin de conocer el funcionamiento de la maquina en presencia de la radiación solar, además de comprender su rango de operación y donde se aprovechó la máxima radiación presente para la transferencia de energía al agua. La radiación fue medida por el sensor DAVIS 6450, el cual presento complicaciones de medición para datos superiores a 1000 W/m^2 , como se corrobora en la figura 64 donde se visualiza el límite de medida del sensor, por tanto, se usó medidor SM206 para tomar datos cada 15 minutos aproximadamente y tener una idea de estos datos que faltan para el análisis de resultados.

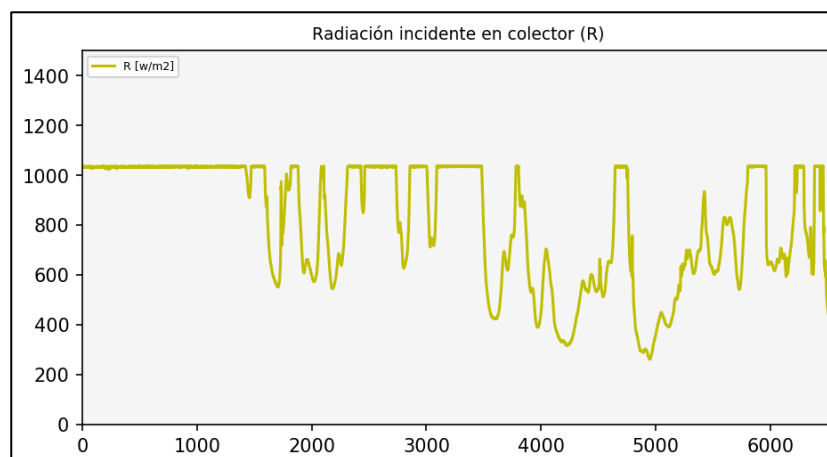


Figura 64. Radiación solar en una prueba medida desde Sensor Davis.

Se realizaron pruebas para conocer la temperatura de salida del agua usando un porcentaje de apertura del 100%, que se efectuó el día 19 de noviembre a las 15:21 horas, donde la temperatura presentó un comportamiento poco variable, es decir rangos entre 40°C y 45°C aproximadamente, sin embargo, para la prueba con el porcentaje de apertura de 10%, realizada el día 18 de noviembre de 2019 a las 13:59 horas, los cambios de temperaturas alcanzados fueron

significativos, ya que se obtuvieron valores alrededor de 60°C, resultados que se muestran en la figura 65.

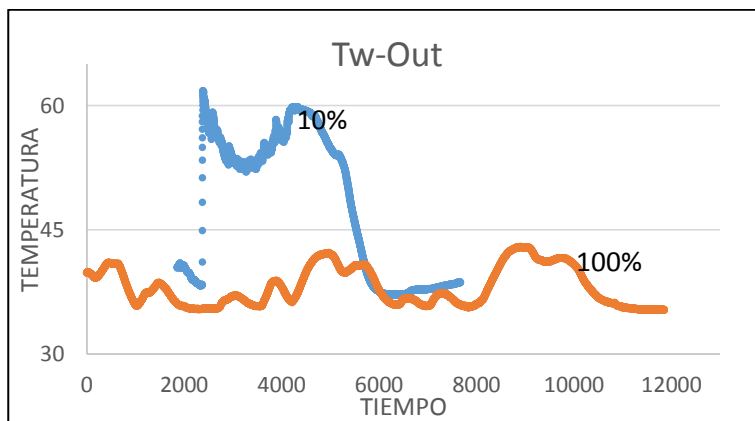


Figura 65. Grafica de la temperatura de salida en compresor OFF

La radiación solar fue fundamental en esta prueba, ya que representó la única fuente de energía que actuó sobre la máquina, a pesar de que esos días estuvieron nublados y con lluvias, las medidas se tomaron en días soleados para garantizar el aprovechamiento del sol, esto permitió conseguir valores de radiación máxima en 1200 w/m² aproximadamente que fueron variando por el estado del clima, como se observa en la gráfica de la figura 66.

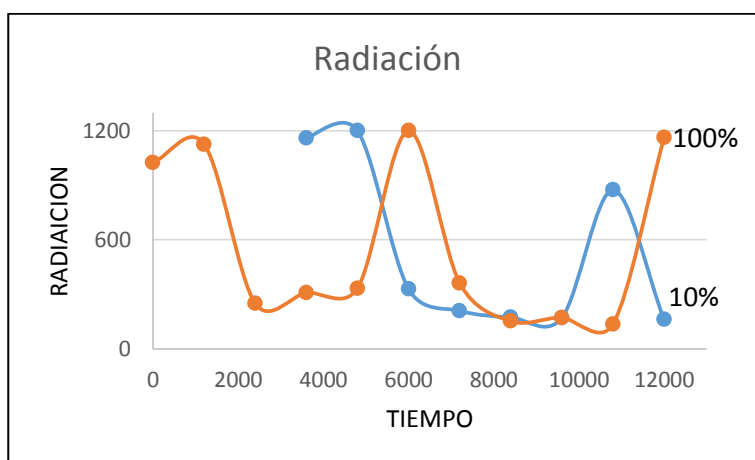


Figura 66. Radiación solar presente en las pruebas con 10% y 100% de apertura en electroválvula.

La energía proporcionada, figura 67, mostró una conducta similar al de la figura 63 donde Q_w máximo se obtuvo con apertura de electroválvula en 100%, nuevamente obedece a la ecuación (5).

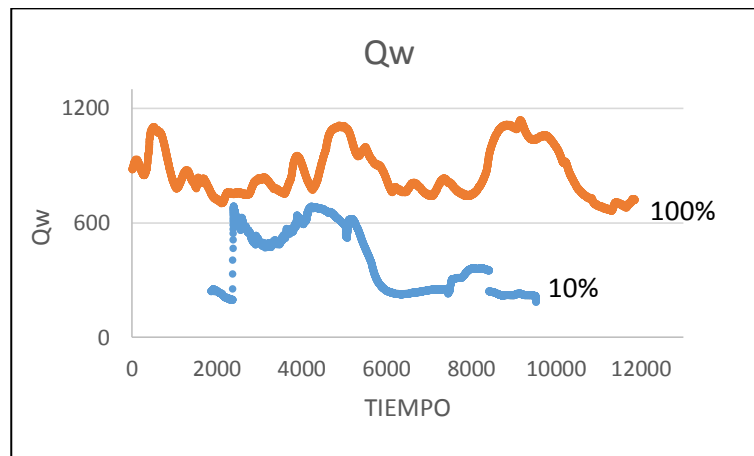


Figura 67. Grafica del Q_w en compresor OFF

8.8. Diseño e implementación de control fuzzy

En la figura 68 se aprecian los elementos que fueron seleccionados para el diseño del controlador, se contó con el colector solar plano con un área de captación de $1,6 \text{ m}^2$, la radiación solar se midió con un sensor Davis 6450, para la presión del refrigerante que pasó por la tubería de cobre desde compresor hermético marca Samsung de $0,874 \text{ kW R22 110VAC}$ se usó un sensor de presión SPT25-10-0300A, las temperaturas de entrada y salida del agua por medio de PT100 y el cambio de flujo en el sistema de efectuó por una electroválvula TCN-02, las temperaturas en T2 y T3, se descartaron puesto que describen procesos térmicos ocurridos en la bomba de calor.

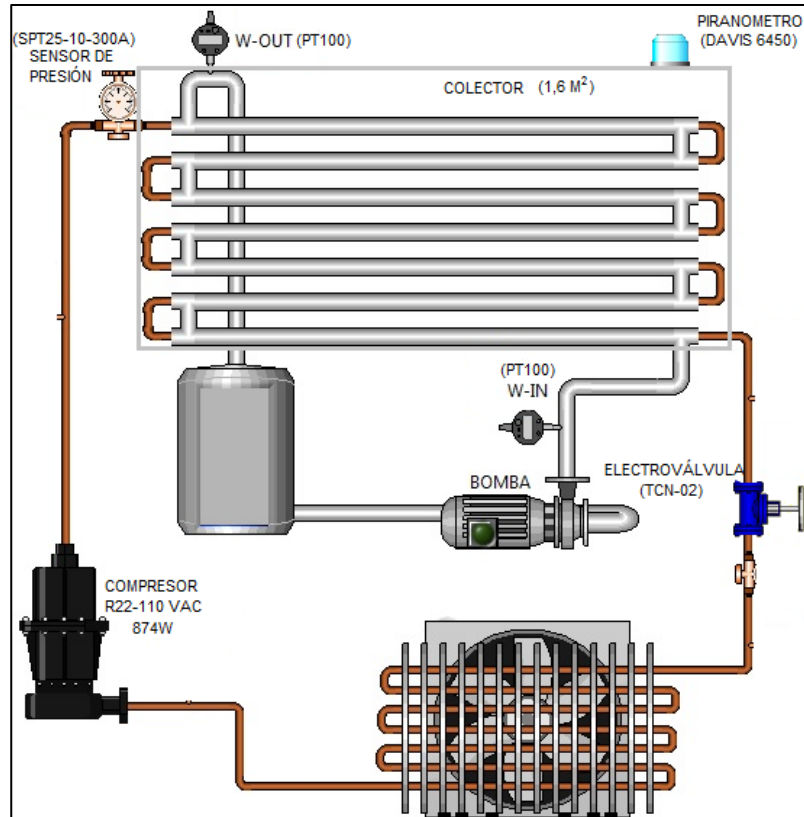


Figura 68. Ubicación de sensores y actuadores en la planta.

8.8.1. Diseño del lazo de control

Se identificaron las variables que corresponden a entradas y salidas en el controlador difuso, resultó conveniente tener dos entradas y una salida. Las entradas para en primer lugar, decidir si aumentar o disminuir la temperatura del agua y posteriormente verificar si se está aplicando la acción de control, para la salida, aplicar una variación en la apertura de la electroválvula por medio de la señal PWM, puesto que a menor flujo de agua se transfiere más calor, el proceso se plasmó en un diagrama de bloques, como se observa en la figura 69, además, para el caso de baja radiación, valores menores de 400 W/m^2 , aplicar o no la marcha del compresor para alcanzar el requerimiento, todo esto en un tiempo de muestreo conveniente.

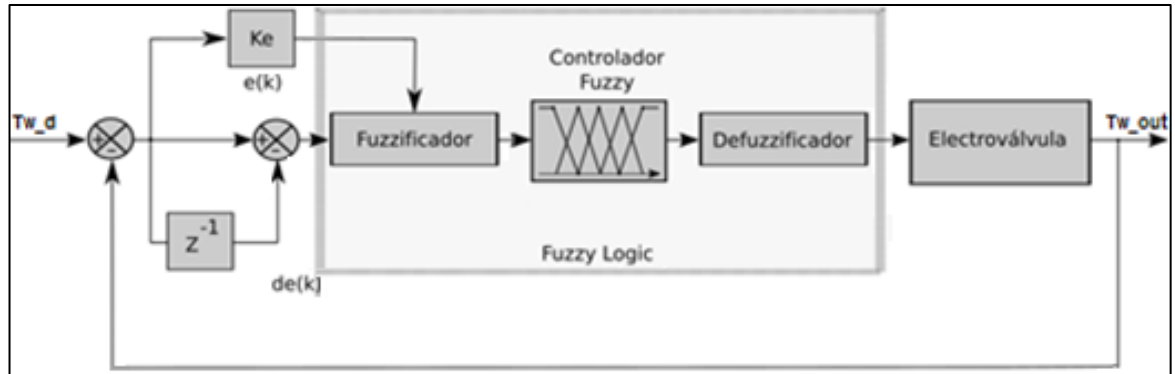


Figura 69. Diagrama de bloques del proceso de control.

El error, se obtuvo de la resta de la temperatura deseada y de la temperatura actual en la salida de la planta, como se muestra en la ecuación 16 (Eq. (16)).

$$e(k) = Tw_d(k) - Tw_out(k) \quad \rightarrow \quad \text{Eq. (16)}$$

Donde:

- k : tiempo de muestreo (s)
- e : Error de temperatura actual ($^{\circ}\text{C}$)
- Tw_d : Temperatura deseada ($^{\circ}\text{C}$)
- Tw_out : Temperatura en el agua de salida actual ($^{\circ}\text{C}$)

El cambio en el error, se obtuvo de la resta entre la temperatura de salida en el tiempo de muestreo actual, y para la temperatura de salida en el tiempo de muestreo anterior, para la salida que corresponde a la variación en la apertura de la electroválvula, se añadieron valores para sumar a la señal PWM, este cálculo se puede observar en la ecuación 17 (Eq. (17)).

$$de(k) = Tw_out(k(n)) - Tw_out(k(n - 1)) \quad \rightarrow \quad \text{Eq. (17)}$$

Donde:

- $de(k)$: cambio en el error de temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
- $k(n)$: tiempo de muestreo actual (s)
- $k(n - 1)$: tiempo de muestreo anterior (s)

8.8.2. Sistema de inferencia difuso

Al identificarse las entradas y salidas para la lógica difusa, se empleó de MATLAB para convertir los parámetros de las entradas y salidas en universos discursos como se muestra en la figura 70. En la lógica difusa se usó el método mamdani y para la defuzificación el método centroide.

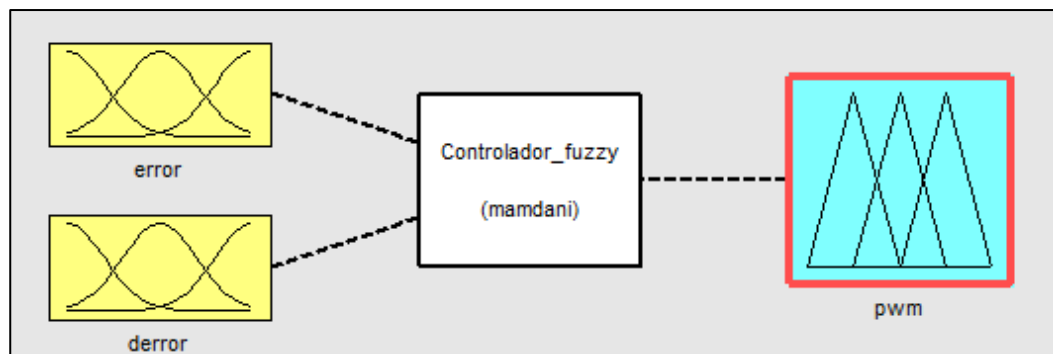


Figura 70. Entradas, salidas y controlador fuzzy.

Empezando con las entradas, para el error (Eq. 16) se manejó un universo entre -40 y 30 $^{\circ}\text{C}$, por motivo que la temperatura máxima posible que puede lograr la planta es aproximadamente 60 $^{\circ}\text{C}$, como se muestra en la superficie de respuesta de compresor on, figura 26, y el agua de entrada tomando como referencia 20 $^{\circ}\text{C}$, temperatura mínima según pruebas, el

error máximo posible en el sistema es de 40 °C, para el caso contrario, la temperatura máxima con la que llega el agua en la entrada del sistema es alrededor de 30 °C, se tomó como referencia 30 °C. Los conjuntos que se establecieron se pueden observar en la figura 71, son los siguientes:

- Error negativo grande [ENG]: valores entre -40 a -10 °C, al ser una función en el extremo izquierdo del universo se empleó una función trapezoidal.
- Error negativo pequeño [ENP]: valores entre -15 a 0 °C, se empleó una función triangular.
- Error cero [EZ]: valores entre -1 a 1 °C, se empleó una función triangular.
- Error positivo pequeño [EPP]: valores entre 0 a 15 °C, se empleó una función triangular.
- Error positivo grande [EPG]: valores entre 10 a 30 °C, al ser una función en el extremo derecho del universo se empleó una función trapezoidal.

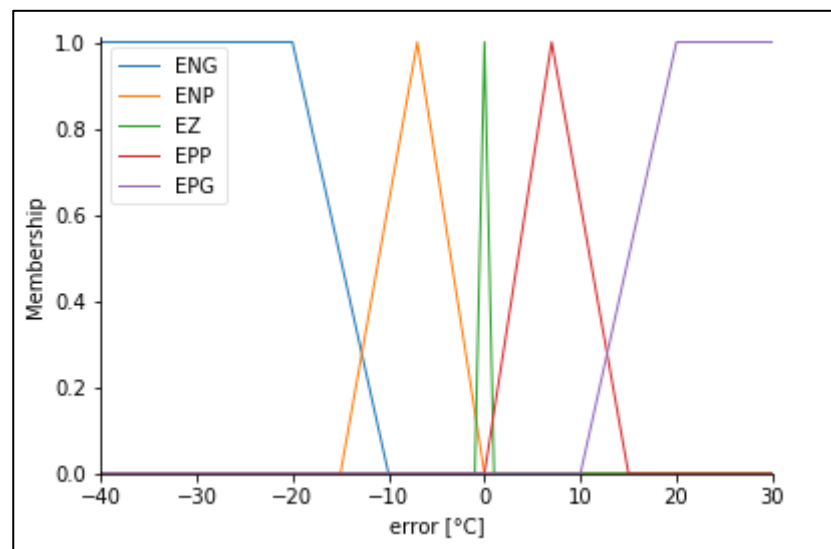


Figura 71. Conjuntos para el universo "error"

En la variación del error (Eq. 17) se manejó un universo entre -10 y 10 °C, se tuvo en cuenta que al tener en reposo la planta ubicada al sol, el calor de procesos internos dentro del colector hace que la temperatura varíe en gran proporción, alcanzando un máximo según pruebas de 20 °C más que la temperatura ambiente en menos de 20 segundos., los conjuntos que se establecieron se pueden detallar en la figura 72, y se optó por los siguientes rangos:

- Delta error baja [DB]: se considera en este rango a los valores de error comprendidos entre -10 a 0 °C, al ser una función en el extremo izquierdo del universo se empleó una función trapezoidal.
- Delta error cero [DZ]: se considera en este rango a los valores de error comprendidos entre -1 a 1 °C, se empleó una función triangular.
- Delta error sube [DS]: se considera en este rango a los valores de error comprendidos entre 0 a 10 °C, al ser una función en el extremo derecho del universo se empleó una función trapezoidal.

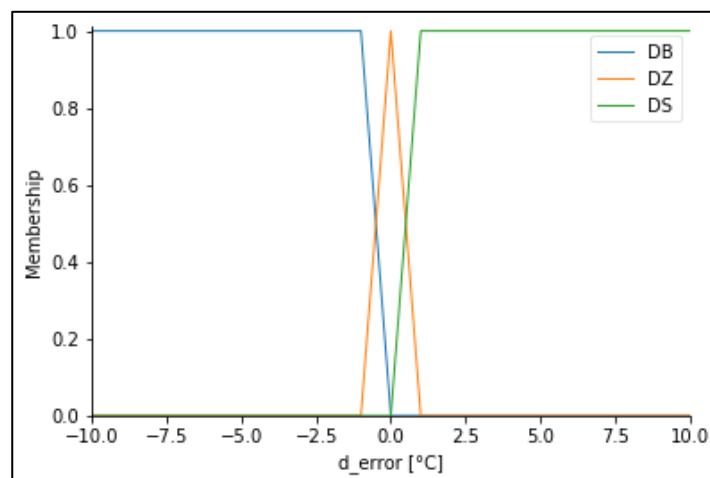


Figura 72. Membresía para los conjuntos en la variación de error.

Finalmente, para la salida del controlador, el universo tiene máximos valores entre -5 y 5 bits, puesto que $255 \text{ bits}/100\% = 2.55 \text{ bits}$ equivalen a 1% de variación en la apertura de la electroválvula, 5 bits corresponden a 2% de variación en la apertura de la electroválvula, que sería la máxima modificación. Los conjuntos que se establecieron para el universo de salida del controlador se mencionan a continuación y se pueden observar en la figura 73, junto con la función que lo modela:

- Actuador baja mucho [BM]: se considera en este rango a los valores comprendidos entre -5 a -2, se restarán bits, al ser una función en el extremo izquierdo del universo se empleó una función trapezoidal.
- Actuador baja [B]: se considera en este rango a los valores comprendidos entre -4 a 0, se restarán bits, se empleó una función triangular.
- Actuador cero [AZ]: se considera en este rango a los valores comprendidos entre -1 a 1, si es necesario se restarán o se sumaran bits, se empleó una función triangular.
- Actuador sube [S]: se considera en este rango a los valores comprendidos entre 0 a 4, por tanto, se sumarán bits. se empleó una función triangular.
- Actuador sube mucho [SM]: se considera en este rango a los valores comprendidos entre 2 a 5, lo que equivale a sumar bits. Al ser una función en el extremo derecho del universo se empleó una función trapezoidal.

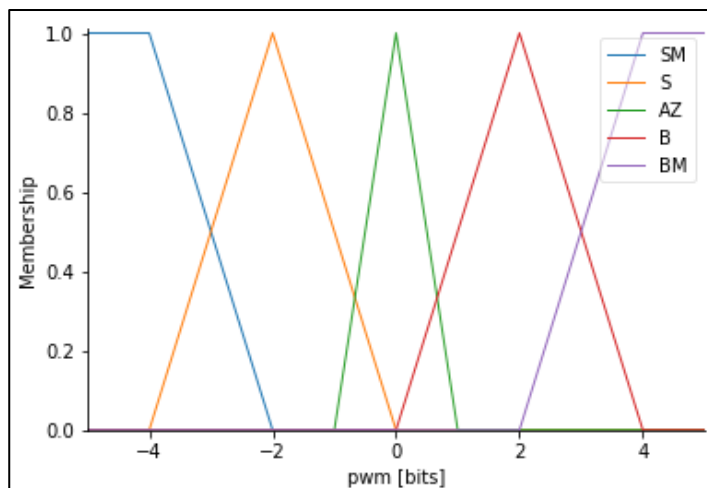


Figura 73. Membresía para el universo de salida del controlador.

Se estableció la relación entre el error y el cambio en el error (Δ error) que se conectan por medio del operador lógico AND y su respectiva consecuencia en la salida del controlador. La forma en la que se establecieron las reglas es la siguiente: IF (antecedente) THEN (consecuencia), siendo el antecedente la conexión error AND Δ error, y la consecuencia la Salida que se muestra en la tabla 4.

Tabla 7. Base de reglas para el controlador difuso

Salida		Δ error		
		DB	DZ	DS
Error	ENG	SM	SM	SM
	ENP	S	S	S
	EZ	AZ	AZ	AZ
	EPP	B	B	B
	EPG	BM	BM	BM

Conforme se describe en comportamiento del controlador en la tabla 4, las 15 reglas resultantes se interpretan de la siguiente manera:

1. IF error is [ENG] AND Δ error [DB] THEN Actuador is [SM].
2. IF error is [ENG] AND Δ error [DZ] THEN Actuador is [SM].
3. IF error is [ENG] AND Δ error [DS] THEN Actuador is [SM].
4. IF error is [ENP] AND Δ error [DB] THEN Actuador is [S].
5. IF error is [ENP] AND Δ error [DZ] THEN Actuador is [S].
6. IF error is [ENP] AND Δ error [DS] THEN Actuador is [S].
7. IF error is [EZ] AND Δ error [DB] THEN Actuador is [AZ].
8. IF error is [EZ] AND Δ error [DZ] THEN Actuador is [AZ].
9. IF error is [EZ] AND Δ error [DS] THEN Actuador is [AZ].
10. IF error is [EPP] AND Δ error [DB] THEN Actuador is [B].
11. IF error is [EPP] AND Δ error [DZ] THEN Actuador is [B].
12. IF error is [EPP] AND Δ error [DS] THEN Actuador is [B].
13. IF error is [EPG] AND Δ error [DB] THEN Actuador is [BM].
14. IF error is [EPG] AND Δ error [DZ] THEN Actuador is [BM].
15. IF error is [EPG] AND Δ error [DS] THEN Actuador is [BM].

Pudiendo ser reducido el número de reglas a 5 implementando otro conector lógico, pero en el IDE de Arduino dificulta la depuración de posibles errores.

8.8.3. Simulación de controlador en Matlab

En el toolbox de MATLAB “Fuzzy Logic Designer”, se diseñó y simuló el algoritmo de control, creando las dos entradas, universos “error” y “derror”, y para la salida el universo “pwm”, según se muestra en la figura 74.

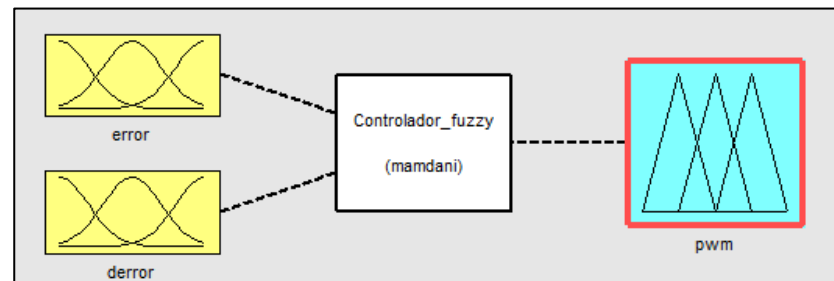


Figura 74. Diagrama de bloques en MatLab que describe el algoritmo de control difuso.

Para los universos discursos “error”, “derror” y “pwm” se crearon las funciones de pertenencia descritas anteriormente en las figuras 71, 72, 73, y se muestran a continuación.

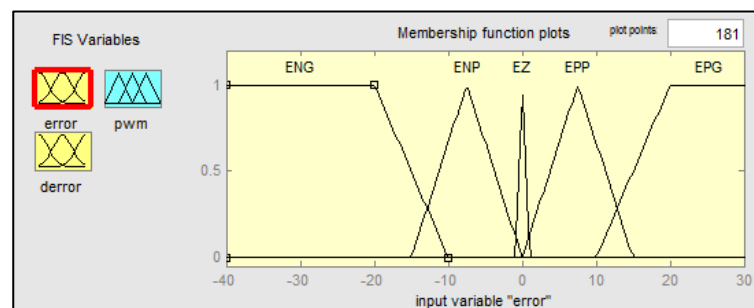


Figura 75. Membresía para los conjuntos de Error en grados Celsius.

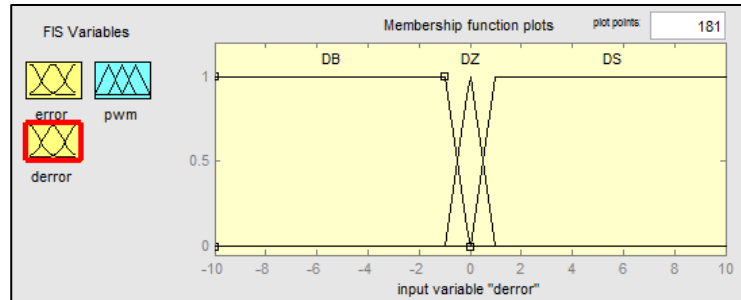


Figura 76. Universo discurso para la variable de entrada “derror”.

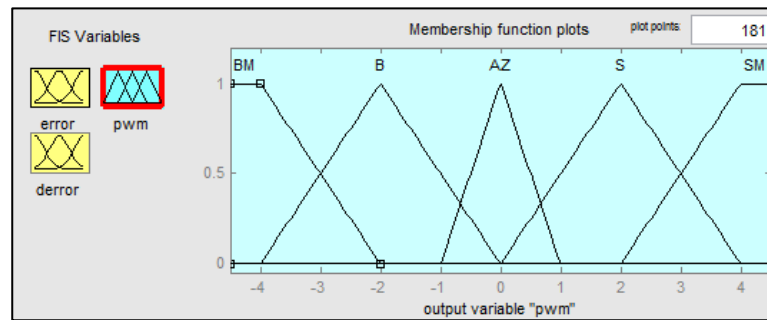


Figura 77. Universo discurso para la variable de salida “PWM”.

Se crearon, las reglas descritas anteriormente, que se pudieron reflejar en el toolbox el total de las 15 reglas descritas como se aprecia en la figura 78.

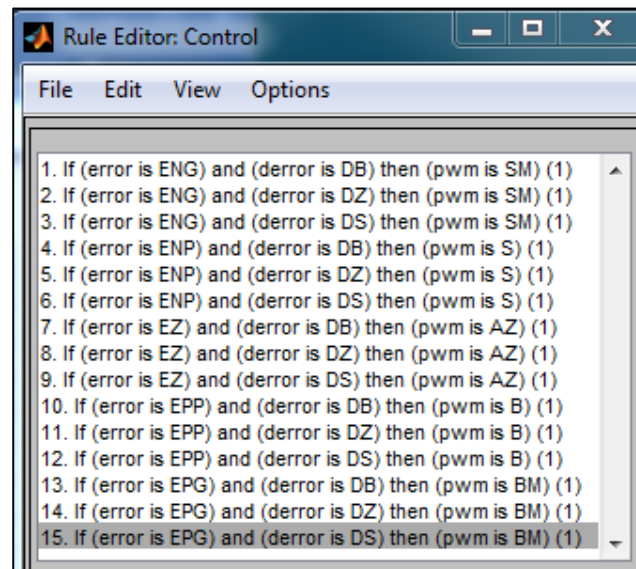


Figura 78. Reglas del controlador

La superficie que representa la acción que realiza el controlador, se muestra en la figura 79, que se obtiene según las reglas, y básicamente indica lo siguiente, a medida que el error es positivo, la señal de salida pwm va a ser negativa y para el caso de un error negativo se dará una señal pwm positiva, recordando que la señal pwm va a dar como resultado la acción a realizar en la electroválvula, abriendo o cerrando el paso de agua.

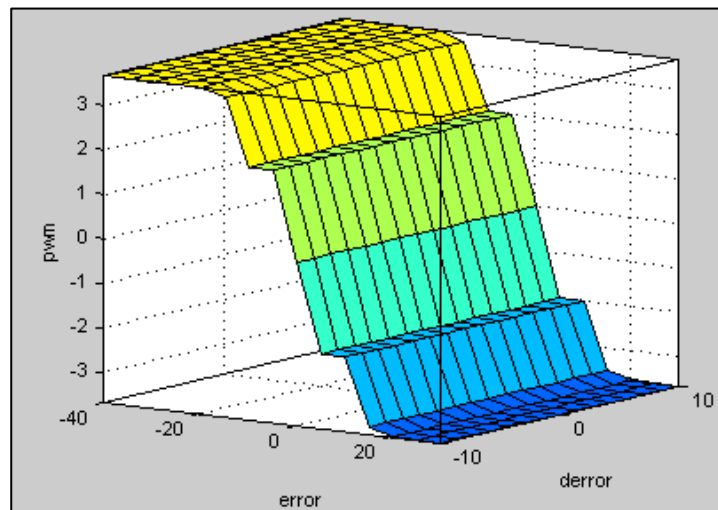


Figura 79. Superficie de respuesta para la salida del controlador difuso.

Para la simulación del proceso de control, se ingresaron los parámetros de error y derror, para obtener el respectivo dato con el que procedería el controlador afectando a la señal pwm. Se realizaron tres pruebas de simulación para verificar que se cumpla la lógica de funcionamiento.

En primer lugar, cuando las entradas son negativas en el controlador, presentar un error de -34°C y un “derror” de $-1,17^{\circ}\text{C}$, como se muestra en la figura 80, significa en el “error”, la temperatura del agua actual es mayor que la deseada y en el “derror” que la temperatura está disminuyendo, aunque según el ejemplo la temperatura está disminuyendo se debe abrir

aumentar el porcentaje de apertura en la electroválvula al máximo para proceder a bajar la temperatura del agua, puesto que el error es máximo, sumando 3,66 bits al PWM.

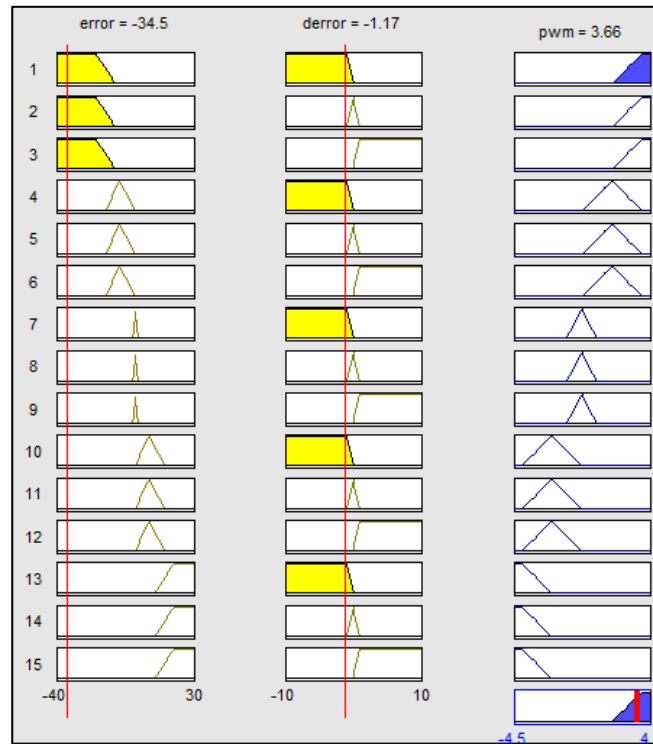


Figura 80. Simulación cuando las entradas son negativas en el controlador.

Ahora, cuando las entradas son próximas a cero en el controlador, al presentar un error de $0,158^{\circ}\text{C}$ y un “derror” de $0,319^{\circ}\text{C}$, como se muestra en la figura 81, significa que se alcanzó la temperatura deseada y que la temperatura no está cambiando por tanto se debe mantener este estado de apertura en la electroválvula, por ello no se debe modificar el PWM en la electroválvula, según la simulación se afecta $-0,165$ bits, lo cual cumple con los requerimientos ya que equivale a $-0,064\%$ de apertura.

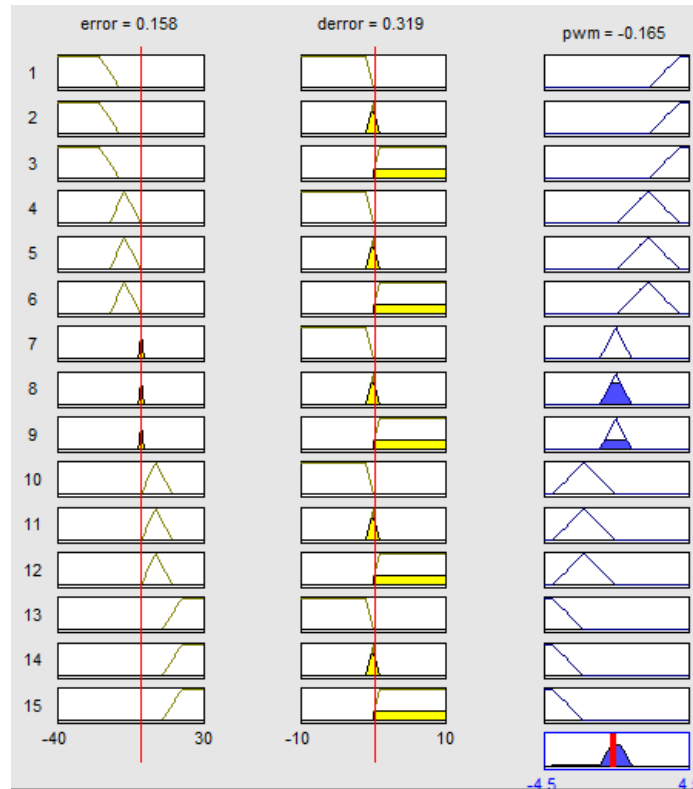


Figura 81. Simulación cuando las entradas son cero en el controlador.

Finalmente cuando las entradas son negativas en el controlador, al presentar un error de 27°C y un “derror” de $7,15^{\circ}\text{C}$, como se muestra en la figura 82, significa que en el “error”, la temperatura del agua deseada es mayor que la temperatura actual y además, que la temperatura está aumentando, contrario a la primera simulación, figura 80, aunque según el ejemplo la temperatura está aumentando se requiere disminuir al máximo el porcentaje de apertura en la electroválvula para proceder a aumentar la temperatura del agua, se restan 3,66 bits al PWM.

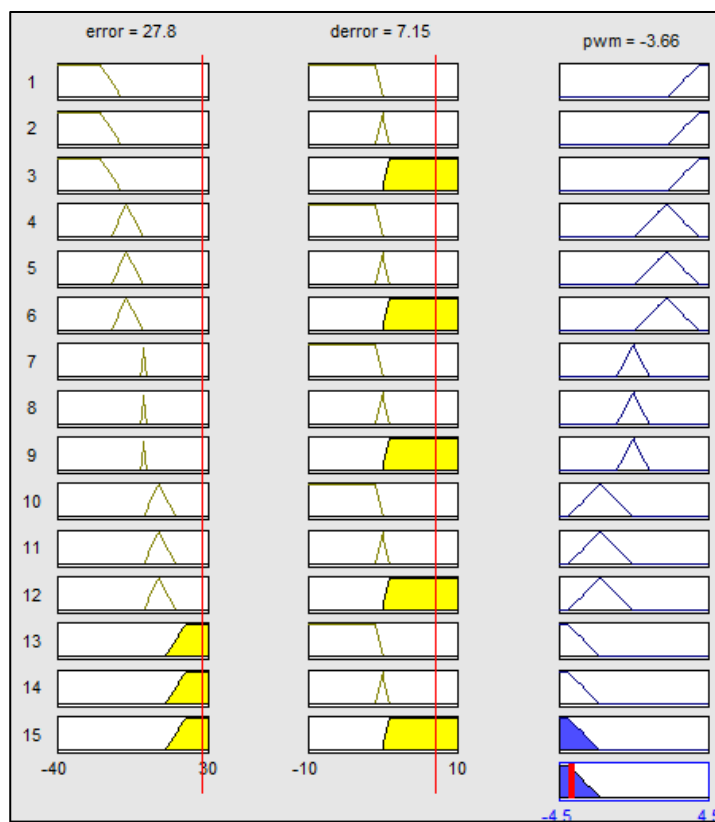


Figura 82. Simulación cuando las entradas son positivas en el controlador.

8.9. Implementación del controlador

El diagrama de flujo de la figura 83, muestra cómo se hace el proceso de elección de modos en el microcontrolador, que se añadió en comparación con el programa desarrollado solo para el modo manual, desarrolló el controlador por medio de la librería eFLL (Alves, Lira, Lemos, Kridi, & Leal, s.f.), el modo automático añadió los antecedentes y las reglas del controlador, condiciones para el accionar del compresor, que solo ocurrirá cuando la temperatura requerida es superior a la temperatura de salida actual en el agua y si la radiación es baja, y la salida del controlador como la variación de la apertura de la electroválvula por medio de la señal PWM como se declaró anteriormente, el tiempo de muestreo para el controlador se estableció de 10 segundos.

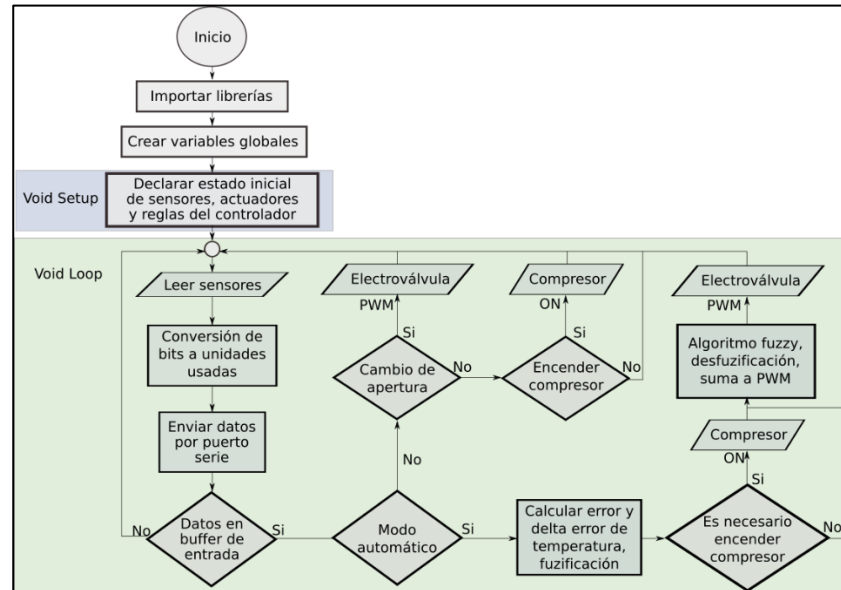


Figura 83. Flujograma que describe el funcionamiento del código final

8.9.1. Pruebas experimentales con controlador

El modulo se ubicó frente a los laboratorios especializados de electrónica de la UFPS, donde la radiación solar es óptima y sin interrupciones, como se muestra en la figura 84.



Figura 84. Ubicación de modulo en el campus para aprovechar radiación solar.

Como resultados se exponen dos pruebas en campo del controlador difuso, en el eje del tiempo (abscisa) cabe resaltar que se maneja en unidades de segundo, en las gráficas de temperatura (ordenada), la línea roja indica el agua de salida en la planta y la línea morada equivale a la de entrada. En la primera prueba, se realizó en la fecha 22 de noviembre de 2019, con una temperatura deseada de 45 °C, se inició a las 11:47:08 horas, para lo cual según las condiciones internas en el módulo se obtuvo inicialmente una temperatura de salida del agua de 39,36 °C, como se ve en la figura 85.

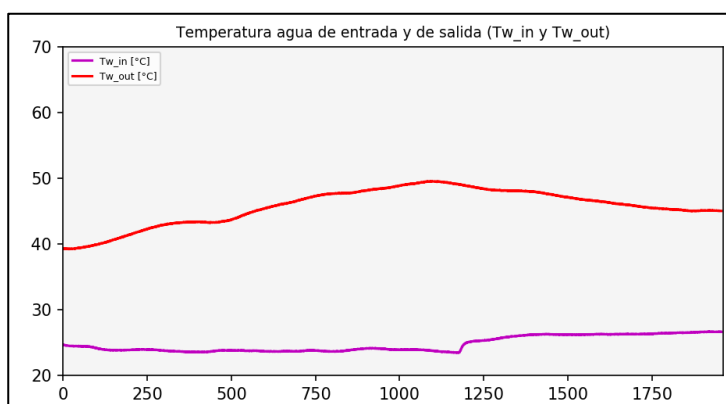


Figura 85. Variación de temperaturas de entrada y salida de agua en prueba 1.

Contando con un error de aproximadamente 5,64°C, que corresponde a un Error Positivo Pequeño, EPP en figura 71 de universo “error”, el cambio en el error (derror) pese a tener máxima radiación no varía en magnitud de 1 °C entre cada muestreo, por tanto se considera que se encuentra en la función de membresía Delta Zero (DZ), según las reglas difusas se decide disminuir el flujo de agua, función de membresía Baja (B), en el universo “pwm”, como se mostró en la figura 73, acción que se evidencia en la figura 86, donde se restaron bits (abscisa) al pwm durante aproximadamente 500 segundos (ordenada), 86(a), y que se refleja en la apertura de la electroválvula en el eje de la abscisa 86(b), donde se tiene por tanto un aumento en la temperatura de agua de salida, como se ve en la figura 85.

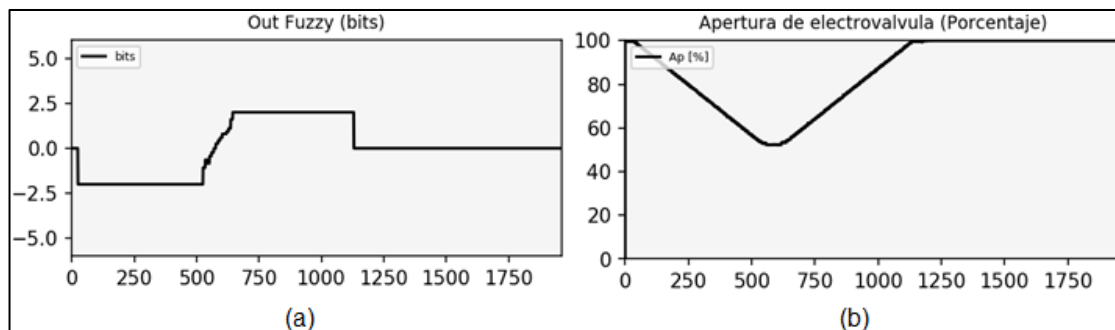


Figura 86. Gráficas de: (a) bits en PWM y (b) apertura de electroválvula en la primera prueba del controlador.

Se alcanzó el requerimiento a las 11:58:34 horas, aproximadamente 10 minutos después de dar la orden al controlador pero al continuar el aumento de temperatura, dada la alta radiación solar, se excedió la temperatura deseada el controlador, procedió a abrir la electroválvula para disminuir la temperatura de agua de salida, al mínimo paso puesto que el error que se encontraba el controlador era negativo pequeño (conjunto de Error Negativo Pequeño, ENP en figura 71) hasta alcanzar el requerimiento a partir de los 1750 segundos de iniciada la prueba, que equivalen a las 12:20:58 horas, y se mantuvo esta temperatura, dando por terminada a las 12:26:33 horas con una temperatura de salida de 45,08 °C, la radiación sobrepasó los 1000 W/m^2 durante toda la prueba como se muestra en el eje vertical (abscisa) en la figura 87(a), por tanto, esta prueba se realizó en condiciones óptimas de uso con una radiación máxima durante aproximadamente 40 minutos, eje horizontal (ordenada), en cuanto a la presión del refrigerante en la tubería de cobre del compresor indica el no uso del actuador en la figura 87(b), con una presión en reposo de 500 KPa que se ve en el eje de vertical.

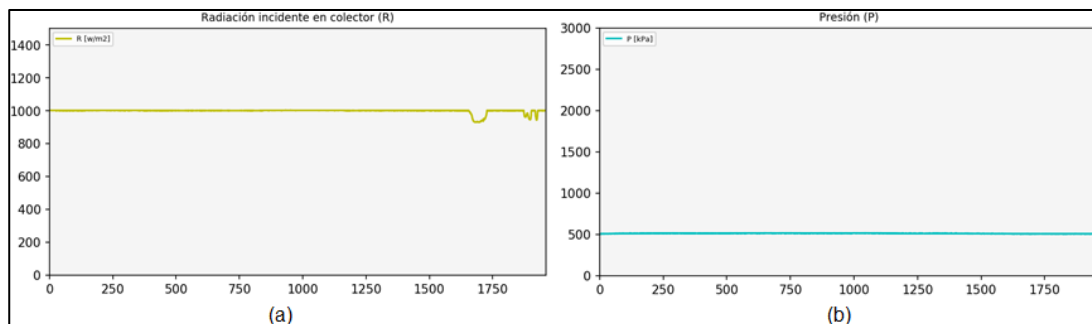


Figura 87. Gráficas de: (a) radiación incidente y (b) presión de refrigerante en la primera prueba del controlador.

En la segunda prueba, que se realizó en la fecha 22 de noviembre de 2019 y se inició a las 16:06:11 horas, con una temperatura deseada de 39 °C, se tuvo unas condiciones de radiación baja, con una máxima de 335 W/m^2 , que fue disminuyendo en el transcurso de la prueba, como lo muestra la figura 88(a), por ello desde el inicio de la prueba se requirió el uso del compresor como lo evidencia la figura 88(b), donde la presión se mantuvo en 1000 KPa.

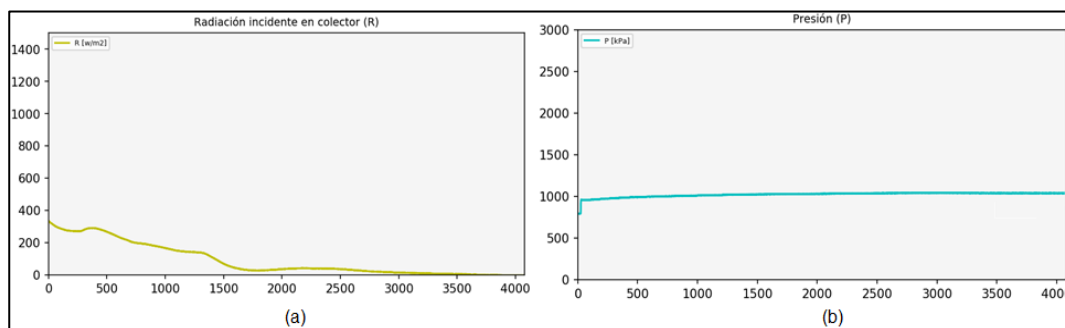


Figura 88. Gráficas de: (a) radiación incidente y (b) presión de refrigerante en la segunda prueba del controlador.

La temperatura en la salida de agua al inicio de la prueba fue de 33,93 °C, como se ve en la figura 89, contando con un error aproximado de 5 °C.

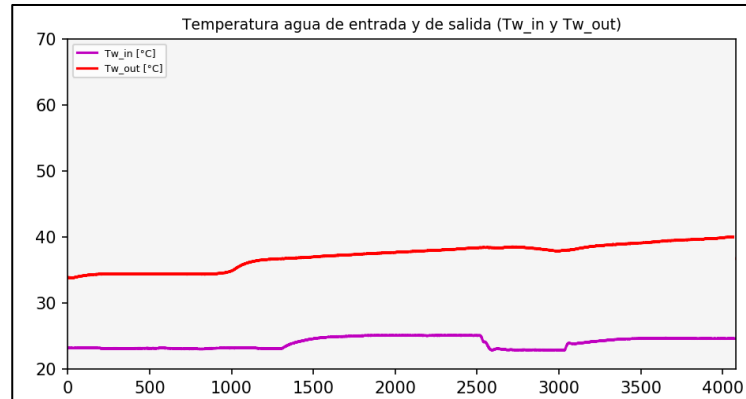


Figura 89. Variación de temperaturas de entrada y salida de agua en prueba 2.

El error de 5 °C, corresponde a la función de membresía Error Positivo Pequeño (EPP), como se ve en la figura 71, de nuevo se toma un cambio en el error “DZ”, puesto que hay cambios menores a 1 °C en la temperatura de salida, por tanto, según las reglas del controlador la salida se encuentra en la función de membresía Baja (B), figura 73, por tanto se empezó a cerrar la electroválvula, como se observa en la figura 90, donde se restaron bits al pwm 90(a), directamente afectando la apertura de la electroválvula 90(b), manteniendo la electroválvula en su mínimo porcentaje de apertura permitido, aumentando la temperatura de agua de salida de manera gradual, como se ve en la figura 89, hasta que se alcanzó el requerimiento a partir de los 3500 segundos de iniciada la prueba, 16:50:55 horas, dando por terminada la prueba a las 17:28:14 horas con una temperatura en el agua de salida de 40,6 °C.

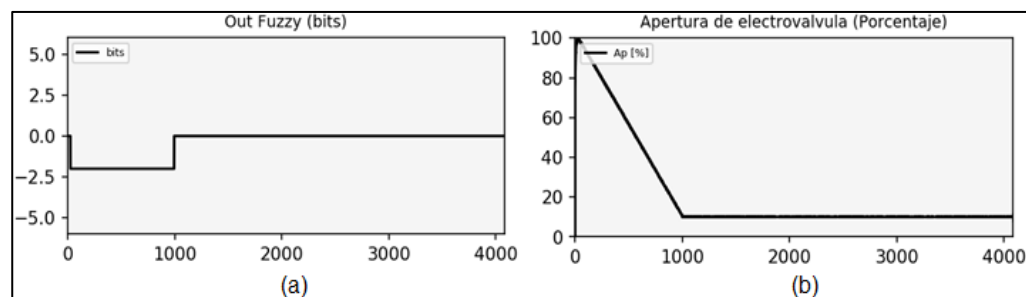


Figura 90. Gráficas de: (a) bits en PWM y (b) Apertura de electroválvula en la segunda prueba de funcionamiento.

Por último, se puede apreciar la interfaz trabajando en tiempo real en la primera prueba expuesta, en la pestaña Resumen, figura 91, donde se ubica el diagrama de bloques se observan los datos respectivos en tiempo real, así como también las gráficas del historial de datos durante la sesión.

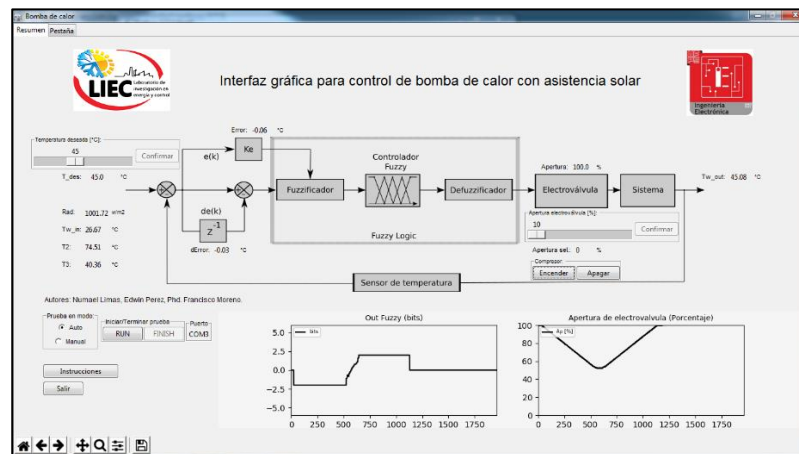


Figura 91. Pestaña principal de la interfaz durante sesión de trabajo.

Por último, se presenta la pestaña secundaria de la interfaz, figura 92, con las gráficas restantes, como de temperatura de entrada y salida de agua, radiación incidente en el colector, temperatura de refrigerante en alta y baja presión, además, de la presión del compresor donde se visualiza la activación o no del actuador.

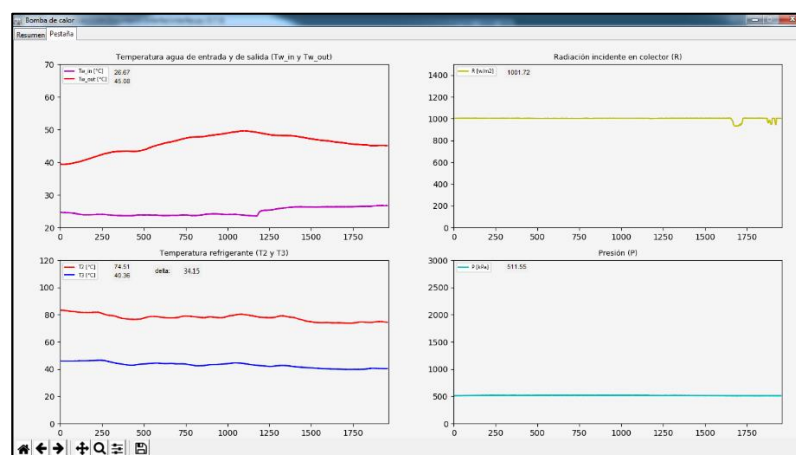


Figura 92. Pestaña secundaria de la interfaz de usuario en sesión de trabajo.

9. Divulgaciones

Como primera divulgación el proyecto se presentó en el evento “IV Simposio de Investigación en Ingeniería y Desarrollo Sostenible”, en la modalidad de ponencia, evento realizado en la Universidad Francisco de Paula Santander entre el 4 al 7 de junio de 2019, presentando el trabajo con el título “Validación de un modelo de predicción en una bomba de calor con asistencia solar para el calentamiento de agua”, los certificados de participación se pueden observar en las figuras 93 y 94.



Figura 93. Certificado de ponencia en simposio.



Figura 94. Certificado de ponencia en simposio.

La segunda divulgación se llevó a cabo con una ponencia oral por medio de un video para el evento “VII Semana Internacional de Ciencia, Tecnología e Innovación”, que se llevó a cabo en los días 6 a 9 de octubre del año 2020, con el trabajo por título “Desarrollo de un sistema de monitoreo y control de una bomba de calor híbrida con asistencia solar para calentamiento de agua residencial”, la carta de aceptación del proyecto se observa en la figura 95, donde se resalta además “un excelente trabajo, de importancia científica que aborda una temática interesante, novedosa y que podrá ser de gran importancia para la comunidad científica”.

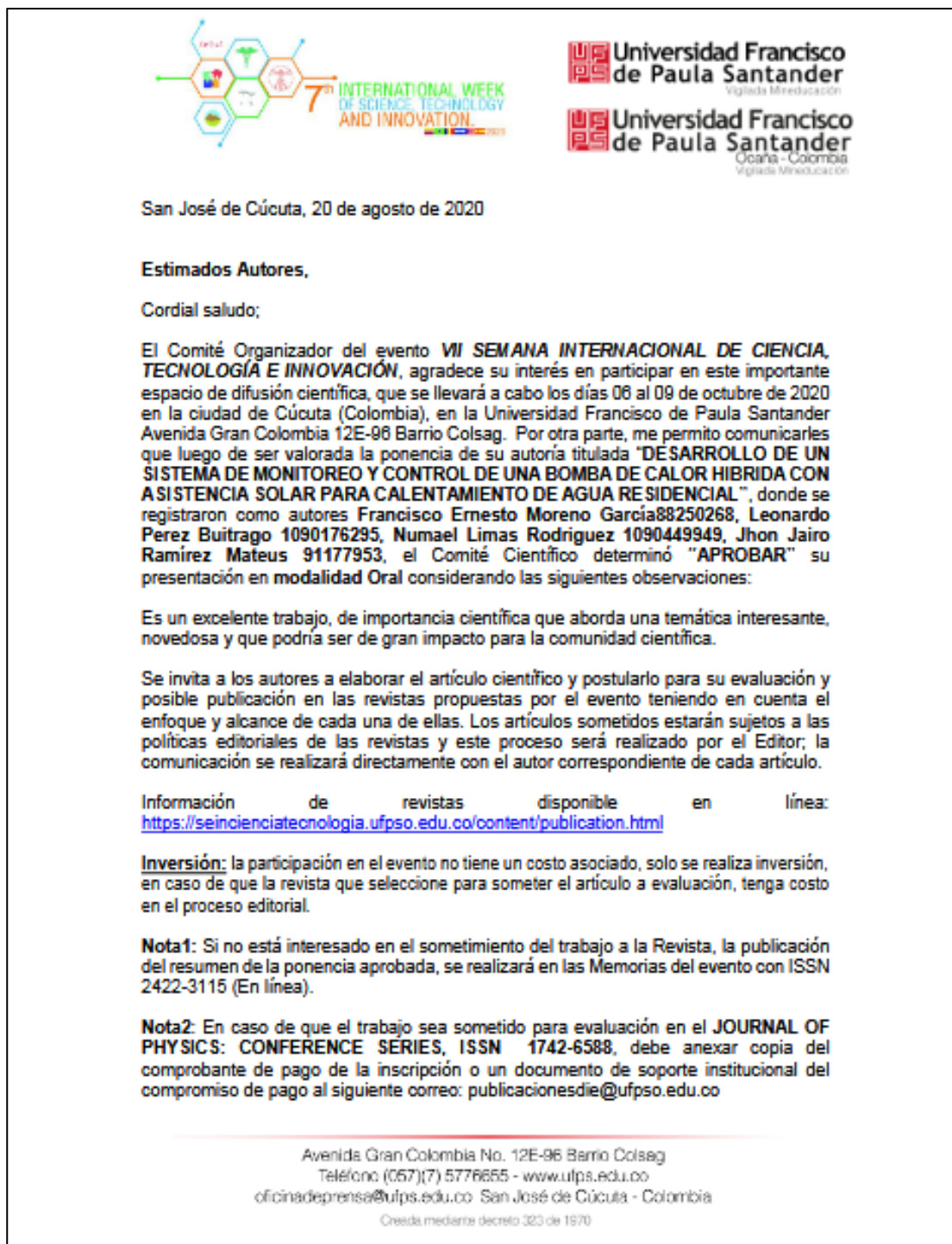


Figura 95. Carta de aceptación de ponencia en la Semana de ciencia, tecnología e innovación.

Como evidencia de la ponencia virtual se muestra la figura 96, donde se observa la descripción del módulo y sus componentes durante el evento.



Figura 96. Evidencia de la ponencia por medio de video.

La tercera divulgación tuvo lugar en XIV Congreso Internacional de Electrónica y Tecnologías de Avanzada modalidad virtual CIETA 2020, que se desarrolló los días 28, 29 y 30 de octubre de 2020 en modalidad de ponencia, llevando como título “SISTEMA PARA MONITOREO Y CONTROL DE UNA BOMBA DE CALOR HIBRIDA SOLAR MEDIANTE HARDWARE Y SOFTWARE LIBRE”, en la figura 97 se aprecia en el puesto P126 la participación como ponentes en este evento organizado por la Universidad de Pamplona.

Jueves	Sala 1B Electrónica	9:40 -10:00 am	P119	Jhonatan Paolo Tovar Soto, Carlos Francisco Pareja Figueredo, Luis Carlos Gutiérrez Martínez	Estrategia de selección de tecnologías de IoT para una plataforma de agricultura 4.0, a través de análisis estadístico
Jueves	Sala 2A Sistemas	10:20 -10:40 am	P120	Nancy Acevedo, Nydia Sandoval, Luz Marina Santos	Estrategia de aprendizaje basado en IoT como apoyo a los cursos de programación en ingeniería
Miercoles	Sala 2 Sistemas	11:40 -12:00 m	P121	Edilma Leonor Díaz, Clara Patricia Avella Ibañez , John A. Bohada	Estrategias pedagógicas y didácticas para superar dificultades en el aprendizaje de la programación en los niveles introductorios
Jueves	Sala 3 Teleco.	9:40 -10:00 am	P122	Daniel Ricardo cortés Garzón	Extracción de parámetros de radioenlace para señales GSM en la banda de 850 MHz usando SDR
Miercoles	Sala 1 Electrónica	11:40 -12:00 m	P123	Jair E. Araujo V, Jorge L. Diaz R, Oscar M. Duque S.	Control difuso tipo 2: fundamentos y aplicaciones
Miercoles	Sala 3 Teleco.	11:00 -11:20 am	P124	Cinthia R. Trejos C., Mauro L. Ibarra P., Oscar M. Duque S.	Buenas prácticas de gestión de calidad en proyectos de telecomunicaciones
Miercoles	Sala 3 Teleco.	11:20 -11:40 am	P125	Yesid Eugenio Santafé Ramón, José Daniel Ramírez Corzo	Revisión del estado del arte, sobre los temas más relevantes en cuanto análisis de inteligencia artificial en malformaciones congénitas espacio fetal
Jueves	Sala 4B Eléctrica	10:40 -11:00 am	P126	Francisco Ernesto Moreno Garcia, John Jairo Ramirez Mateus, Numael Limas Rodriguez and Edwin Leonardo Perez Buitrago	System for monitoring and control of a solar hybrid heat pump through hardware and free software

Figura 97. Evidencia de la participación en el evento

Fuente: (Pamplona, 2020) Listado de ponencias CIETA 2020

10. Conclusiones

Se confirmó que el modelo estático desarrollado corresponde y, además permite la predicción del comportamiento del sistema bajo diferentes parámetros físicos al constatar los resultados experimentales y teóricos.

Se estableció el límite de operación del sistema cuando está el compresor apagado entre 30 °C y 45 °C, y activado entre los 45 °C y 65 °C.

Se recomienda la aplicación de dos sensores de temperatura adicionales, para conocer la eficiencia del colector solar, apoyándose en la temperatura ambiente y la temperatura en la cámara solar, donde se transforma la radiación solar en energía térmica.

Se concluyó de las superficies de respuesta que teniendo una temperatura de entrada de agua en el sistema lo suficientemente alta, alrededor de 30 °C según las superficies de respuesta, figuras 25 y 26, se pueden compensar las variaciones de radiación solar, por tanto, al hacer recircular el agua se podría aprovechar la temperatura que se transfiere.

Se aconseja que para la medición del flujo del refrigerante R22 se use un sensor de flujo másico tipo coriolis, ya que, esta variable se calculó teóricamente por el balance de energía del sistema.

Se sugiere el uso de un sensor de radiación solar que permita capturar datos más exactos y precisos en la medición, teniendo en cuenta que el máximo cambio obtenido en el porcentaje de radiación solar incidente en el colector fue de 82.28%, en un periodo de 2 horas.

Como recomendación a futuras investigaciones, se visa estudiar desempeño del compresor trabajando con otros tipos de refrigerantes.

Entender los resultados obtenidos en la máquina nos permitió establecer en un rango de operación de 32°C a 60°C para el usuario y que, mediante el código de programación, se tome la decisión de que porcentaje de apertura fuese el indicado para la temperatura solicitada.

Se recomienda el uso de un sensor de radiación distinto al DAVIS 6450 ya que en valores de radiación superiores a 1000 W/m² se satura y mantiene este valor, aunque para las pruebas realizadas no afectó de ninguna manera, se podría haber llevado un gran seguimiento a la radiación y cambios en temperatura.

El controlador difuso se simuló con la herramienta Fuzzy Logic Designer de MATLAB y se implementó con la librería eFLL de Arduino, se muestra gran congruencia entre ambos resultados, puesto que ambos usan el controlador tipo mamdani y la defusificación en centroide.

El controlador implementado cuando se estableció una temperatura deseada de 41° C, cumplió esa exigencia en un tiempo de 29 minutos, con un error de precisión de ± 1 °C,

trabajando bajo una radiación óptima, superior a 1000 W/m^2 en la que el colector toma el papel principal en la transferencia de calor.

Cuando el controlador se ve obligado a actuar con el compresor debido a la baja radiación, tiene curvas más suaves (dinámica suave) hasta llegar al requerimiento, como se muestra en la figura 89, donde la temperatura no tiene cambios tan pronunciados y alcanza 40°C , cumpliendo el requerimiento de 39°C , pero le cuesta el doble de tiempo que al colector cuando tiene máxima radiación, aproximadamente 1 hora.

Las funciones de membresía del universo “derror” que refleja el cambio en el error, deben ser más finas (ajustar sus límites), puesto que actualmente los cambios que se generan de un tiempo de muestreo al otro son casi insignificantes y en ningún caso llegan a ser apreciables por el controlador.

El control de tipo difuso permite que un sistema no lineal, que depende de muchos factores se comporte forzosamente como un sistema lineal con determinadas acciones para cada caso probable de ocurrencia.

El sistema Mamdani implementado en Arduino presenta ventajas en cuanto a prestaciones, precisión y fácil uso, aunque se sugiere crear reglas de máximo un solo conector lógico ya que más de estas son susceptibles una fácil revisión y solución de errores, puesto que a más conectores lógicos el código deja de ser tan “legible” a simple vista, por la sintaxis que se usa con la librería.

Como se evidencia en los archivos generados respecto al estado de la planta, las variaciones que ejercen los actuadores en cuanto a temperatura se ven reflejados en el orden de 1 °C al minuto de dar la orden el controlador, por tanto, se obtendría una mejor respuesta si se aplicara este lapso o más como tiempo de muestreo, además, de poder generar unos cambios más grandes en cuanto a la apertura de la electroválvula cuando el error sea muy grande.

Cuando se hace necesario emplear la bomba de calor, el controlador se ve obligado a actuar con el mínimo de apertura en la electroválvula para lograr la máxima transferencia de calor posible, caso contrario cuando hay alta radiación donde el controlador varía de muchas maneras la apertura para poder mantener el requerimiento.

Referencias bibliográficas

5Hertz Electrónica. (s.f.). Obtenido de

https://www.5hertz.com/index.php?route=tutoriales/tutorial&tutorial_id=11

Adafruit. (s.f.). *Learn Adafruit*. Recuperado el 1 de Mayo de 2019, de

<https://learn.adafruit.com/adafruit-max31865-rtd-pt100-amplifier/>

Alves, A., Lira, R., Lemos, M., Kridi, D., & Leal, K. (s.f.). *Embedded Fuzzy Logic Library*.

Recuperado el 23 de Julio de 2019, de <https://github.com/zerokol/eFLL>

Amazon. (s.f.). Obtenido de [https://www.amazon.es/Arduino-Mega-2560-R3-](https://www.amazon.es/Arduino-Mega-2560-R3-Microcontrolador/dp/B0046AMGW0)

[Microcontrolador/dp/B0046AMGW0](https://www.amazon.es/Arduino-Mega-2560-R3-Microcontrolador/dp/B0046AMGW0)

Arduino. (s.f.). Obtenido de <https://www.arduino.cc/en/main/software>

Arduino. (s.f.). Obtenido de <https://www.arduino.cc/en/reference/SPI>

Arduino. (s.f.). Obtenido de

<https://www.arduino.cc/reference/en/language/functions/communication/serial/>

ARDUINO. (s.f.). Obtenido de <https://www.arduino.cc/en/Main/ContributorLicenseAgreement>

Arduino. (s.f.). *Arduino*. Recuperado el 23 de Julio de 2019, de

<https://www.arduino.cc/reference/tr/language/functions/communication/serial/readstring/>

Arduino. (s.f.). *Arduino*. Recuperado el 25 de Julio de 2019, de

<https://www.arduino.cc/reference/en/language/variables/data-types/string/functions/tofloat/>

ARDUINO MEGA 2560. (s.f.). Obtenido de

<http://www.mantech.co.za/datasheets/products/A000047.pdf>

Boylestad, R. L. (2004). Fuente con divisor de voltaje. En *Introducción al análisis de circuitos* (pág. 226). Mexico: Pearson Educacion.

- Cartagena, U. P. (4 de Dic de 2017). *Repositorio Digital Crai UPC Biblioteca*. Obtenido de <http://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/6257/tfm-ser-sis.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Cho, E. a. (2011). Variable fuzzy control for heat pump operation. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 25(1), 201-208.
- Cirovic, M. M. (2003). Transistores de union bipolar. En *Electrónica fundamental: dispositivo, circuitos y sistemas* (págs. 51-53). California: Editoria Reverté S.A. Obtenido de <https://books.google.com.co/books?id=IZQzgLA3U8sC&pg=PA51&dq=transistor&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwi0xcX7jY7mAhWHm1kKHdRpAi4Q6AEINjAC#v=onepage&q=transistor&f=false>
- Colombia, R. d. (2014). *Presidencia de la Republica* . Obtenido de <http://wsp.presidencia.gov.co/Normativa/Leyes/Documents/LEY%201715%20DEL%2013%20DE%20MAYO%20DE%202014.pdf>
- Comercio, S. d. (s.f.). *Superintendencia de Industria y Comercio*. Obtenido de http://www.sic.gov.co/sites/default/files/normatividad/Ley_142_1994.pdf
- Davide Rolando, H. M. (Junio de 2018). *Smart Control Strategies for Heat Pump Systems*. Recuperado el 9 de Mayo de 2019, de http://effsysexpand.se/wp-content/uploads/2018/09/P18_Project_Report_final_reviewed.pdf
- Direct, A. (s.f.). *AutomationDirect.com*. Obtenido de https://www.automationdirect.com/adc/shopping/catalog/process_control_-a-_measurement/pressure_sensors/pressure_transmitters/stainless_steel_sensing_element_-_integral_cable/spt25-10-0300a

- electric, s. (s.f.). *SENSOR DE TEMPERATURA PT100*. Obtenido de https://www.schneider-electric.com/resources/sites/SCHNEIDER_ELECTRIC/content/live/FAQS/239000/FA239836/ru_RU/5pt100sensoren_e.pdf
- Electroválvula. (s.f.). *tcystal*. Obtenido de <http://www.tcystal.cn/>
- forestry-suppliers. (s.f.). *ebay*. Obtenido de <https://www.ebay.com/itm/Davis-Solar-Radiation-Sensor/121749233142>
- García, R. J., Torres, J. M., Pinto, A. D., González, J. A., Rengel, J. E., & Pérez, N. A. (enero de 2017). *INGENIARE revista chilena de ingeniería*. Obtenido de https://www.ingeniare.cl/index.php?option=com_ingeniare&view=va&aid=544&vid=91&lang=es
- Giacomo Braida, R. T. (2016). *Preliminary analysis of the potential energy saving achievable with a predictive control strategy of a heat pump for a single family house*.
- HETPRO. (s.f.). *Herramientas Tecnológicas Profesionales*. Obtenido de <https://hetpro-store.com/TUTORIALES/transistor-bjt/>
- IDEAM. (2012). *Promedios climáticos 1981-2010 en Colombia*.
- Islam, M. R. (2012). Performance study on solar assisted heat pump water heater using CO₂ in a transcritical cycle. *International Conference on Renewable Energies and Power Quality*. Santiago de Compostela.
- Jaimes, D., & Bueno, R. (2017). *Estudio experimental de una bomba de calor incorporando material PCM*. Cúcuta: Universidad Francisco de Paula Santander.
- Levenspiel, O. (2014). *Engineering flow and heat exchange* (Tercera ed.). Corvallis: Springer.
- Levenspiel, O. (2014). *Engineering Flow and Heat Exchange* (Tercera ed.). Corvallis, Orlando, USA: Springer.

LICENCIA DE MATLAB. (s.f.). Obtenido de <https://la.mathworks.com/academia/matlab-campus.html>

LICENCIA DEIBIAN. (s.f.). Obtenido de <https://www.debian.org/legal/licenses/index.es.html>

LICENCIA PYTHON. (s.f.). Obtenido de <https://docs.python.org/3/license.html>

Llamas, L. (s.f.). *ingenieria, Informatica y Diseño*. Obtenido de <https://www.luisllamas.es/arduino-spi/>

Mak, D. K. (2003). *The Science of Financial Market Trading*. World Scientific.

Maxim Integrated. (s.f.). Obtenido de <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX31865.pdf>

Michaelides, E. (2012). *Alternative Energy Sources*. Fort Worth, Texas, USA: Spriger.

Minero-Energética, U. d. (s.f.). *UPME*. Obtenido de http://www.upme.gov.co/normatividad/upme/ley_143_1994.pdf

Musunuri, R. K., Sánchez, D., & Rodriguez, R. (2007). *Solar Thermal Energy*. Gävle.

Naylamp. (s.f.). Recuperado el 9 de Septiembre de 2019, de <https://naylampmechatronics.com/sensores-temperatura-y-humedad/174-sensor-de-temperatura-rtd-pt100-2-hilos.html>

NumFOCUS. (s.f.). *Matplotlib*. Recuperado el 10 de Julio de 2019, de <https://matplotlib.org/>

NumFOCUS. (s.f.). *Pydata*. Recuperado el 15 de Septiembre de 2019, de <https://pandas.pydata.org/>

Numpy. (s.f.). *numpy*. Recuperado el 10 de Julio de 2019, de <https://numpy.org/>

Pamplona, U. d. (octubre de 2020). *CIETA XIV*. Obtenido de <https://investigacionesup.pw/CIETA/listaponencia.pdf>

PySerial. (s.f.). *PySerial*. Recuperado el 24 de Septiembre de 2019, de

<https://pyserial.readthedocs.io/en/latest/tools.html>

python. (s.f.). Obtenido de <https://www.python.org>

Python. (s.f.). *Python*. Recuperado el 2 de Agosto de 2019, de

<https://docs.python.org/2/library/tkinter.html>

Python. (s.f.). *Python*. Recuperado el 2 de Agosto de 2019, de

<https://docs.python.org/3/library/time.html>

Python. (s.f.). *Python*. Recuperado el 11 de Septiembre de 2019, de

<https://docs.python.org/2/library/sys.html>

Python. (s.f.). *Python*. Recuperado el 13 de Agosto de 2019, de

<https://docs.python.org/3/library/gc.html>

Python. (s.f.). *The Python Package Index (PyPI)*. Recuperado el 22 de Agosto de 2019, de

<https://pypi.org/project/pyserial/>

REN21. (2015). *Renewables 2015 Global Status Report*. Obtenido de [https://www.ren21.net/wp-](https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2015_Full-Report_English.pdf)

[content/uploads/2019/05/GSR2015_Full-Report_English.pdf](https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2015_Full-Report_English.pdf)

Robert F. Coughlin, F. F. (1998). En *Amplificadores operacionales y circuitos integrados*

lineales (pág. 62). Mexico: Prentice Hall Hispanoamerica S.A.

Robert F. Coughlin, F. F. (1998). Amplificadores inversores y no inversores. En *Amplificadores*

operacionales y circuitos integrados lineales (pág. 58). Mexico: Prentice Hall

Hispanoamericana S.A. Obtenido de

<https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=vGqE52oO2BQC&oi=fnd&pg=PR27>

[&dq=circuito+seguidor+de+voltaje&ots=149LIZ2ZRz&sig=nWnio01s2ch-](https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=vGqE52oO2BQC&oi=fnd&pg=PR27&dq=circuito+seguidor+de+voltaje&ots=149LIZ2ZRz&sig=nWnio01s2ch-)

6UAkooqRw5jH_2Q&redir_esc=y#v=onepage&q=circuito%20seguidor%20de%20volta
je&f=false

Robert F. Coughlin, F. F. (1998). Amplificadores inversores y no inversores. En *Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales* (pág. 59). Mexico: Prentice Hall Hispanoamericana S.A.

Robert F. Coughlin, F. F. (1998). Amplificadores inversores y no inversores. En *1998Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales* (pág. 65). Mexico: Prentice Hall Hispanoamericana S.A.

Senseit. (s.f.). Recuperado el 9 de Septiembre de 2019, de <http://senseit.com/product/sm206-handheld-solar-power-meter-light-meter-solar-radiation-tester-glass-light-intensity-meter/>

SENSOR & MODULOS. (s.f.). Obtenido de <http://files.amperka.ru/store-media/products/water-flow-sensor/media/YF-S201.pdf>

SENSOR DE PRESION. (s.f.). Obtenido de <https://cdn.automationdirect.com/static/specs/prosensespt25transmitters.pdf>

SENSOR DE RADIACION SOLAR. (s.f.). Obtenido de https://www.davisinstruments.com/product_documents/weather/spec_sheets/6450_SS.pdf

Smith, J. M., Van Ness, H. C., & Abbott, M. M. (1996). *Introduction to Chemical Engineering thermodynamics*. McGraw-Hill.

Sobhan Fathollahi, H. S. (2015). Simulation study on the thermal performance of a direct-expansion solarassisted. *Modares mechanical engineering*, 15(12), 232-242.

SPDT, R. 5. (s.f.). *Brico Geek*. Obtenido de <https://tienda.bricogeek.com/componentes/260-rele-5v-spdt.html>

Struchtrup, H. (2014). *Thermodynamics and energy conversion*. British Columbia: Springer.

The International Renewable Energy Agency. (July de 2018). *Renewable Energy Statistics 2018*.

Obtenido de <https://www.irena.org/publications/2018/Jul/Renewable-Energy-Statistics-2018>

The International Renewable Energy Agency. (July de 2018). *The Renewable Energy Statistics*

2018. Obtenido de <https://www.irena.org/publications/2018/Jul/Renewable-Energy-Statistics-2018>

Via Industrial. (s.f.). Recuperado el 9 de Septiembre de 2019, de

https://www.viaindustrial.com/catalogos_pdf/medidores-de-radiaciones-solares-sm-206-dr-meter-catalogo-ingles.pdf

Viloria, J. R. (s.f.). *Montaje eléctrico de instalaciones solares termicas*. Obtenido de

https://books.google.com.co/books?id=VhNbDwAAQBAJ&pg=PA115&dq=que+es+un+rele+electronico&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwi2-_3ToY7mAhXn1FkKHUfkA0YQ6AEIPzAD#v=onepage&q=que%20es%20un%20rele%20electronico&f=false

Vishay Semiconductors. (s.f.). Obtenido de <http://www.vishay.com/docs/81864/4n25x000.pdf>

Vishay Semiconductors. (s.f.). Obtenido de <http://www.vishay.com/docs/83725/4n25.pdf>