

**Universidad Católica de Santa María**

**Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales**

**Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Mecánica Eléctrica y**

**Mecatrónica**



**IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DE SUELO RADIANTE POR AGUA PARA EL  
LABORATORIO DE TERMO-FLUIDOS DE LA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE  
SANTA MARÍA**

Tesis presentada por el Bachiller:

**Alpaca Rendón, Orlando Jesús**

Para optar el Título Profesional de:

**Ingeniero Mecatrónico**

Asesor:

**Dr. Gordillo Andia, Carlos Alberto**

**Arequipa – Perú**

**2021**

UCSM-ERP

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA**  
**INGENIERIA MECANICA, MECANICA-ELECTRICA Y MECATRONICA**  
**TITULACIÓN CON TESIS**  
**DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR**

Arequipa, 01 de Septiembre del 2021

**Dictamen: 004216-C-EPIMMEM-2021**

Visto el borrador del expediente 004216, presentado por:

**2013240581 - ALPACA RENDON ORLANDO JESUS**

Titulado:

**IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DE SUELO RADIANTE POR AGUA PARA EL LABORATORIO  
DE TERMO-FLUIDOS DE LA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA**

Nuestro dictamen es:

**APROBADO**

**1530 - FERNANDEZ BARRIGA CAMILO GRIMALDO  
DICTAMINADOR**



**3040 - VALDEZ LOAIZA JUAN CARLOS  
DICTAMINADOR**

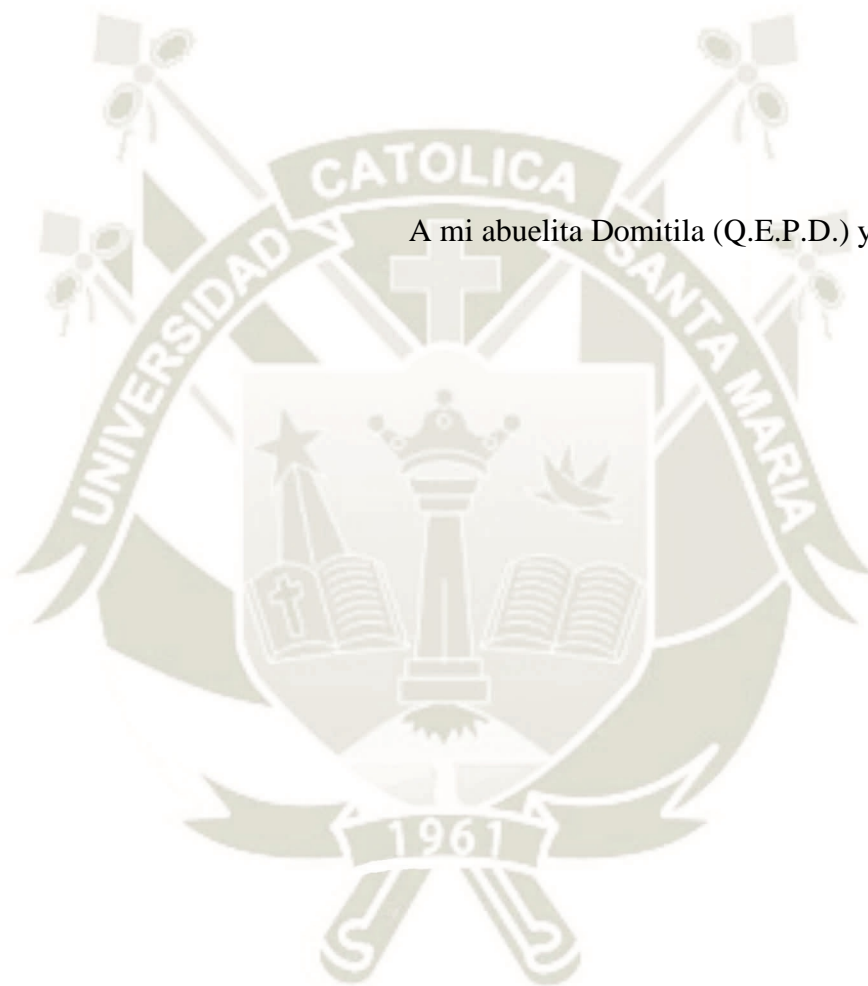


**9185 - SIERRA VASQUEZ JULIO RAUL  
DICTAMINADOR**



## DEDICATORIA

A mi abuelita Domitila (Q.E.P.D.) y a mis padres.



## AGRADECIMIENTOS

Agradezco principalmente a Dios por bendecirme dándome la oportunidad haber asistido a la universidad, y ayudarme en todo momento de la realización de la presente tesis y de mi vida.

Agradezco a mis padres por su constante esfuerzo para que el presente trabajo sea posible, por haberme dado una educación y por tener fe en mí en todo momento.

A mi asesor, el ingeniero Carlos Gordillo, por su apoyo, su tiempo y comprensión, guiándome para que el presente proyecto sea culminado.

Al ingeniero Juan Carlos Valdez, por su tiempo y atención hacia el presente proyecto, por sus sugerencias para el desarrollo del módulo para el laboratorio de termo-fluidos.

Agradezco al señor Humberto Diaz por haberme ayudado en la construcción del módulo y por su buena voluntad de trabajo.

A todas las personas que me ayudaron, les brindo mis mejores deseos y que Dios les retribuya infinitamente. Gracias.

## RESUMEN

En el presente documento se desarrolló un módulo con fines educativos de un sistema de calefacción por suelo radiante por agua para el laboratorio de termo-fluidos de la Universidad Católica de Santa María, el cual se pretende sirva como un medio experimental para complementar las bases teóricas sobre los principios termodinámicos que intervienen en este tipo de sistemas de climatización y promover su uso en la industria local.

Se diseñó el módulo de manera que pueda ser manipulado de manera manual mediante interruptores, y también para que pueda ser manipulado mediante una computadora por medio de una interfaz hombre-máquina desarrollada en el programa Labview. Por ello, el presente documento detalla el diseño mecánico y electrónico del módulo.

El diseño mecánico contiene los cálculos pertinentes para el dimensionamiento de los componentes funcionales del módulo de suelo radiante por agua, de manera que el módulo quede operativo en su modo de trabajo manual.

El diseño electrónico comprende el diseño del sistema pertinente para que el módulo pueda ser operado por una computadora, incluyendo el desarrollo de un sistema de control digital PID (Proporcional-Integral-Derivativo) modificado en su forma PI-D implementado en el microcontrolador Atmega328p para controlar la temperatura del agua de abastecimiento del módulo. El microcontrolador se programó utilizando el entorno de desarrollo integrado (IDE) Atmel Studio 7 (Microchip Studio), con el compilador GCC en lenguaje C.

Finalmente se realizó un análisis de incertidumbre en la medición de los sensores de temperatura que interactúan con el microcontrolador para su calibración.

**Palabras Clave:** Módulo de suelo radiante por agua, Control PID, Atmega328p, Análisis de incertidumbre, Control de temperatura del agua, Interfaz hombre-máquina.

## ABSTRACT

In this document, a water based underfloor heating system module with educational purposes was developed for the Catholic University of Santa Maria thermo-fluids laboratory. This module is expected to be useful for rounding out the understanding of the thermodynamic principles upon which this type of heating system is based and, in turn, for promoting its use, all this through an experimental approach.

The design of the module was such that it has the faculty of being operated manually, via switches and buttons, and being operated by a computer through a user interface programmed in Labview. That being so, the design process of the module is presented in two main parts, the mechanical design and the electronic design.

In the mechanical design, the corresponding calculations for the appropriate selection of the underfloor heating system components is detailed. That is to say, the mechanical design encompasses anything that ensures the functionality of the module in its manual operation mode.

The electronic design tackles the development of the system needed in order to manipulate the module through a computer, which includes the design of a digital PID controller modified in its PI-D form to control the temperature of the water supply for the module. This controller was implemented in the Atmega328p microcontroller using the Atmel Studio 7 IDE along with the GCC compiler in C language.

Finally, a measurement uncertainty analysis in the temperature readings made by the measurement system interacting with the microcontroller was carried out to properly calibrate it.

**Key Words:** Water based underfloor heating module, PID controller, Atmega328p, Uncertainty Analysis, Water temperature control, User interface.

## INTRODUCCIÓN

El sector de la climatización ha cobrado, en las últimas décadas, una mayor importancia por las implicaciones sociales y medioambientales que conlleva, teniendo como consecuencias normativas más estrictas que lo regulen. Teniendo el objetivo de crear un ambiente de confort saludable y eficiente, el sistema de calefacción por suelo radiante es el sistema que proporciona una mejor relación entre el confort, salubridad y el bajo consumo energético en la actualidad (Fegeca & Fenercom, 2017).

Bajo este contexto, si bien este tipo de sistema de climatización no es reciente, las limitantes tecnológicas en el ámbito de materiales y regulación, impidieron que este sistema de climatización se convirtiera en un estándar. No obstante, en la actualidad no se tienen dichas limitantes, con lo que la climatización por superficies radiantes se considera una tecnología innovadora que requiere su inserción en el mercado por sus numerosas ventajas sobre los sistemas de climatización convencionales (Fegeca & Fenercom, 2017; Uponsor, 2013).

Es por ello que la presente tesis surge como una propuesta para promover y familiarizar a los estudiantes de pregrado de la Universidad Católica de Santa María con los sistemas de climatización por superficies radiantes, basándose en un enfoque práctico-experimental para complementar la explicación de los principios bajo los cuales funciona este sistema de climatización.

Dicho esto, en el presente documento se desarrolló el diseño de un módulo educativo de calefacción por suelo radiante por agua, de manera que pueda ser manipulado de manera manual o mediante una computadora, y de esa manera resaltar la importancia del campo de control en el ámbito de climatización, en particular para sistemas de superficie radiante.

Para ello, se distribuyó el desarrollo de la presente tesis en cuatro capítulos como se describe a continuación:

En el Capítulo I se cubre el marco metodológico de la presente tesis, definiendo los objetivos del proyecto, evaluando su relevancia, y delimitando los alcances del mismo.

En el Capítulo II se aborda el marco teórico pertinente al proyecto, proveyendo el contexto y antecedentes pertinentes bajo los cuales se realizará el diseño del módulo.

En el Capítulo III se desarrolla el diseño del módulo de suelo radiante, abarcando tanto el diseño mecánico del módulo (funcionamiento manual del módulo) como el diseño electrónico (automatización del módulo).

En el Capítulo IV se desarrolla la calibración del sistema de medición de temperatura desarrollado en el diseño electrónico mediante un análisis de incertidumbre en la medición del mismo, también se presentan las pruebas llevadas a cabo sobre el módulo para corroborar su funcionamiento con sus respectivos resultados, así como también la descripción del uso para el manejo del módulo.

Finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones extraídas durante el desarrollo del proyecto, así como los anexos del presente documento, los cuales contienen los planos mecánicos, eléctricos y electrónicos del módulo.

## ÍNDICE

DEDICATORIA .....	iii
AGRADECIMIENTOS .....	iv
RESUMEN .....	v
ABSTRACT.....	vi
INTRODUCCIÓN .....	vii
ÍNDICE.....	ix
ÍNDICE DE TABLAS .....	xii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiii
SIMBOLOGÍA Y ABREVIATURAS.....	xv
CAPÍTULO I: MARCO METODOLÓGICO .....	1
1. Identificación de la Problemática.....	1
2. Justificación.....	2
2.1 Relevancia Científica.....	2
2.2 Relevancia Social .....	3
3. Objetivos .....	4
3.1 Objetivo General.....	4
3.2 Objetivos Específicos .....	4
4. Hipótesis.....	5
5. Alcances y Limitaciones .....	5
CAPÍTULO II: MARCO TEORICO .....	7
1. Sistemas de Climatización por Superficies Radiantes .....	7
1.1 Calefacción por Suelo Radiante .....	7
1.2 Principio de Funcionamiento del Suelo Radiante.....	8
1.3 Características Relevantes de una Instalación de Suelo Radiante.....	9
1.4 Sectores de Aplicación de un Sistema de Climatización por Suelo Radiante .....	11
1.5 Antecedentes de Módulos Experimentales de Suelo Radiante.....	11
2. Mecanismos de Transferencia de Calor .....	13
2.1 Transferencia de Calor por Conducción.....	13
2.2 Transferencia de Calor por Convección .....	15
2.3 Transferencia de Calor por Radiación.....	16
2.4 Concepto de Resistencia Térmica en Transferencia de Calor Estacionaria .....	17
CAPÍTULO III: DISEÑO E INGENIERIA .....	18
1. Diseño Mecánico.....	18

1.1	Parámetros de la Cámara de Pruebas del Módulo .....	18
1.2	Cálculo del Sistema de Suelo Radiante en la Cámara de Pruebas del Módulo .....	21
1.2.1	Verificación del Aislamiento Térmico de la Cámara de Pruebas del Módulo .....	22
1.2.1.1	Cálculo de las Pérdidas Térmicas de la Cámara de Pruebas .....	22
1.2.1.2	Cálculo del Calor Suministrado por el Suelo a 29 °C.....	26
1.2.2	Cálculo de la Potencia Total Entregada por la Red de Tuberías.....	29
1.2.3	Longitud de Tubería de Cobre Flexible en la Cámara de Pruebas .....	31
1.2.4	Caudal de Agua y Temperatura de Impulsión del Agua.....	32
1.3	Selección de Componentes Funcionales del Módulo .....	35
1.3.1	Componentes de Medición del Módulo .....	35
1.3.1.1	Medición de Temperaturas .....	36
1.3.1.2	Medición del Caudal .....	37
1.3.1.3	Medición de la Presión Estática.....	37
1.3.2	Componentes Funcionales del Módulo.....	38
1.3.2.1	Tanque de Abastecimiento de Agua del Módulo.....	38
1.3.2.2	Bomba Hidráulica del Módulo.....	38
1.3.2.3	Resistencias Sumergibles Calefactoras (Terma Eléctrica) .....	38
2.	Diseño Electrónico .....	39
2.1	Diseño de los Circuitos del Sistema Electrónico del Módulo .....	39
2.1.1	Circuito de Control de Potencia de las Resistencias Calefactoras Sumergibles.....	40
2.1.1.1	Circuito de Detección de Cruce por Cero .....	40
2.1.1.2	Circuito de Disparo del Pulso de Activación.....	42
2.1.2	Circuito de Control de la Bomba Hidráulica .....	46
2.1.3	Circuito de Encendido de Ventiladores de Refrigeración.....	49
2.1.4	Circuito de Acondicionamiento de Señal del Sensor LM35.....	51
2.2	Diseño del Controlador Digital PID en su Forma Modificada PI-D .....	54
2.2.1	Identificación de la Función de Transferencia de la Planta .....	54
2.2.2	Diseño del Control Digital PI-D .....	56
<b>CAPÍTULO IV: CALIBRACIÓN, PRUEBAS EXPERIMENTALES Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>		<b>61</b>
1.	Análisis de Incertidumbre (Calibración) en la Medición de Temperatura del Sistema Electrónico del Módulo.....	61
1.1	Modelado del Error en la Calibración del UUT .....	62

1.2 Incertidumbre en el Error de Medición del Termostato XMTG-2301-J (MTE) .....	63
1.3 Incertidumbre en el Error del Sistema de Medición a Calibrar (UUT) .....	64
1.3.1 Incertidumbre en el Bloque 1 (Sensor de Temperatura LM35) .....	64
1.3.2 Incertidumbre en el Bloque 2 (Op amp 1, Seguidor de Tensión) .....	65
1.3.3 Incertidumbre en el Bloque 3 (Op amp No inversor) .....	66
1.3.4 Incertidumbre en el Bloque 4 (Convertor ADC, Atmega328p) .....	67
1.3.5 Incertidumbre en el Bloque 5 (Ecuación Lineal para Interpretar la Temperatura Medida).....	68
1.4 Resultado de la Calibración del Sistema de Medición (UUT) .....	69
2. Operación, Pruebas y Resultados Experimentales del Módulo.....	70
2.1 Identificación de las Partes Funcionales del Módulo .....	70
2.2 Operación y Realización de Pruebas Experimentales del Módulo en Modo Manual .....	71
2.2.1 Pasos para la Puesta en Marcha del Módulo.....	71
2.2.2 Resultados de las Pruebas Experimentales .....	73
2.3 Operación y Pruebas de Funcionamiento del Sistema Electrónico del Módulo.....	75
CONCLUSIONES .....	79
RECOMENDACIONES.....	80
REFERENCIAS.....	82
ANEXOS .....	84
ANEXO A: PLANOS MECÁNICOS DEL MÓDULO DE SUELO RADIANTE.....	84
ANEXO B: PLANOS DEL SISTEMA ELÉCTRICO DEL MÓDULO .....	89
ANEXO C: PLANOS DEL SISTEMA ELECTRÓNICO DEL MÓDULO .....	96

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b>	<i>Resistencia Térmica Descendente Recomendada para Suelo Radiante</i>	20
<b>Tabla 2</b>	<i>Resistencias termicas de superficies interiores y exteriores en cerramientos</i>	23
<b>Tabla 3</b>	<i>Resistencia térmica de cámaras cerradas de aire sin ventilar</i>	23
<b>Tabla 4</b>	<i>Propiedades de los Materiales de la Cámara de Pruebas del Módulo</i>	24
<b>Tabla 5</b>	<i>Calculo de las Temperaturas Superficiales Interiores del Recinto</i>	27
<b>Tabla 6</b>	<i>Propiedades del Aire a 24.5 °C y 1 atm</i>	28
<b>Tabla 7</b>	<i>Propiedades del Agua a 39 °C</i>	33
<b>Tabla 8</b>	<i>Características Electricas del Atmega328p</i>	39
<b>Tabla 9</b>	<i>Características Electricas de componentes del circuito de cruce por cero</i>	41
<b>Tabla 10</b>	<i>Componentes del Circuito Control Angulo de Fase y sus Características</i>	43
<b>Tabla 11</b>	<i>Componentes del Circuito de Control de la Bomba y sus Características</i>	47
<b>Tabla 12</b>	<i>Componentes del Circuito de Control de Ventiladores</i>	50
<b>Tabla 13</b>	<i>Componentes y Características del Circuito de Acondicionamiento de Señal</i>	52
<b>Tabla 14</b>	<i>Incremento de Temperatura del Agua ante una Señal de Control Máxima</i>	54
<b>Tabla 15</b>	<i>Identificación e Incertidumbre de las Fuentes de Error del XMTG-2301-J</i>	63
<b>Tabla 16</b>	<i>Identificación e Incertidumbre de las Fuentes de Error del LM35</i>	64
<b>Tabla 17</b>	<i>Identificación e Incertidumbre de las Fuentes de Error del LM358</i>	65
<b>Tabla 18</b>	<i>Identificación e Incertidumbre de Errores del LM358 (no inversor)</i>	66
<b>Tabla 19</b>	<i>Identificación e Incertidumbre de Errores del ADC del Atmega328p</i>	67
<b>Tabla 20</b>	<i>Identificación e Incertidumbre del Procesamiento de Datos</i>	69
<b>Tabla 21</b>	<i>Resultados de la Prueba de Funcionamiento del Módulo (XMTG-2301-J)</i>	73
<b>Tabla 22</b>	<i>Prueba Experimental del Módulo (Sistema Electrónico)</i>	78

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> <i>Artículos de Investigación sobre suelo radiante anuales en ScienceDirect</i> .....	3
<b>Figura 2</b> <i>Perfil de Temperatura de Distintos Métodos de Calefacción</i> .....	8
<b>Figura 3</b> <i>Variación de la Temperatura Operativa en un Recinto Cerrado</i> .....	9
<b>Figura 4</b> <i>Instalación de un Sistema de Suelo Radiante</i> .....	9
<b>Figura 5</b> <i>Efecto de la Ausencia de la Estratificación del Aire</i> .....	10
<b>Figura 6</b> <i>Módulo Experimental Desarrollado por Diaz &amp; Tinta (2017)</i> .....	11
<b>Figura 7</b> <i>Módulo Experimental Desarrollado por Berrio &amp; Hanco</i> .....	12
<b>Figura 8</b> <i>Módulo Experimental Desarrollado por Marrero Marin</i> .....	12
<b>Figura 9</b> <i>Conducción de Calor a Través de un Medio</i> .....	14
<b>Figura 10</b> <i>Conducción de Calor Estacionaria por un Medio Plano</i> .....	14
<b>Figura 11</b> <i>Conduccion Estacionaria de Calor por un Medio Cilindrico</i> .....	15
<b>Figura 12</b> <i>Variacion de Temperatura y Velocidad del Fluido en la Convección</i> .....	16
<b>Figura 13</b> <i>Analogía Electrica en el Análisis de Transferencia de Calor Estacionario sin Generación de Calor</i> .....	17
<b>Figura 14</b> <i>Distribución de los Materiales Base del Suelo Radiante del Módulo</i> .....	21
<b>Figura 15</b> <i>Esquema de la Distribución de Calor Entregado por la Red de Tuberias de Agua Caliente</i> .....	30
<b>Figura 16</b> <i>Distribución de Tuberia Utilizada en el Módulo</i> .....	32
<b>Figura 17</b> <i>Controlador Manual de Temperatura XMTG-2301-J</i> .....	36
<b>Figura 18</b> <i>Hidrómetro utilizado para la Medición Indirecta del Caudal</i> .....	37
<b>Figura 19</b> <i>Bomba Humboldt LRP32-60/180 de 3 velocidades</i> .....	38
<b>Figura 20</b> <i>Esquema del Circuito de Detección de Cruce por Cero</i> .....	40

<b>Figura 21</b> <i>Esquema del Circuito de Control de Angulo de Fase</i> .....	43
<b>Figura 22</b> <i>Esquema Circuito de Control de Bomba Hidraulica</i> .....	47
<b>Figura 23</b> <i>Esquema Circuito de Control de Ventiladores</i> .....	49
<b>Figura 24</b> <i>Esquema del Circuito de Acondicionamiento del Sensor LM35</i> .....	51
<b>Figura 25</b> <i>Respresentación Grafica de la Respuesta de la Planta</i> .....	55
<b>Figura 26</b> <i>Obtencion de la Funcion de Transferencia de la Planta</i> .....	56
<b>Figura 27</b> <i>Diagrama de Bloques del Sistema de Control Digital</i> .....	56
<b>Figura 28</b> <i>Lugar de las Raices del Sistema en el Plano Z y Polos Dominantes Deseados</i> .....	58
<b>Figura 29</b> <i>Lugar de las Raices del Sistema Compensado y su Respuesta</i> .....	59
<b>Figura 30</b> <i>Sistema de Medición a Calibrar (UUT)</i> .....	61
<b>Figura 31</b> <i>Identificación de las Partes Principales del Módulo en su Operación Manual</i> .....	70
<b>Figura 32</b> <i>Encendido del Módulo, Paso 1</i> .....	72
<b>Figura 33</b> <i>Encendido del Módulo, Paso 2</i> .....	72
<b>Figura 34</b> <i>Incorporación del Sistema Electrónico del Módulo</i> .....	75
<b>Figura 35</b> <i>Funcionamiento de la Interfaz de Usuario y el Controlador PID (1)</i> .....	76
<b>Figura 36</b> <i>Funcionamiento de la Interfaz de Usuario y el Controlador PID (2)</i> .....	76
<b>Figura 37</b> <i>Funcionamiento de la Interfaz de Usuario y el Controlador PID (3)</i> .....	77
<b>Figura 38</b> <i>Funcionamiento de la Interfaz de Usuario y el Controlador PID (4)</i> .....	77
<b>Figura 39</b> <i>Comprobación del Control de Voltaje sobre las Resistencias Calefactoras ..</i>	78

## SIMBOLOGÍA Y ABREVIATURAS

### SÍMBOLOGÍA:

#### CAPÍTULO III:

- DISEÑO MECÁNICO.**

k:	Conductividad Térmica	$[\frac{W}{m \cdot K} \text{ ó } \frac{W}{m \cdot ^\circ C}]$ .
A, A <sub>s</sub> :	Área Superficial (perpendicular al flujo de calor)	[m <sup>2</sup> ].
T:	Temperatura Superficial en un cuerpo	[°C ó K].
T <sub>∞</sub> :	Temperatura del Fluido suficientemente alejada de superficies	[°C ó K].
L <sub>c</sub> :	Longitud Característica	[m].
h:	Coefficiente de Convección	$[\frac{W}{m^2 \cdot K} \text{ ó } \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}]$ .
Q̇:	Razón de Transferencia de Calor	[W].
Ẇ:	Potencia Eléctrica	[W].
q̇:	Flujo de Calor	$[\frac{W}{m^2}]$ .
L:	Longitud de una Tubería o Cilindro	[m].
R:	Resistencia Térmica ó Resistencia Térmica Unitaria (por área)	$[\frac{^\circ C}{W} \text{ ó } \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}]$ .
Nu:	Número de Nusselt	[Adimensional].
Ra:	Número de Rayleigh	[Adimensional].
β:	Coefficiente de Expansión Volumétrica	$[\frac{1}{K}]$ .
g:	Gravedad	$[\frac{m}{s^2}]$ .
ν:	Viscosidad Cinemática	$[\frac{m^2}{s}]$ .
Pr:	Número de Prandtl	[Adimensional].

Re:	Número de Reynolds	[Adimensional].
$\mu$ :	Viscosidad Dinámica	$[\frac{Kg}{m*s}]$ .
$\rho$ :	Densidad	$[\frac{kg}{m^3}]$ .
$\dot{m}$ :	Flujo másico	$[\frac{Kg}{s}]$ .
m:	Masa	[Kg].
$C_p$ :	Calor Específico a presión constante	$[\frac{J}{Kg*K} \text{ ó } \frac{J}{Kg*°C}]$ .
$\Delta T_{lm}$ :	Diferencia media logarítmica entre temperaturas	[°C ó K].
$\varepsilon$ :	Emisividad de una superficie (entre 1 y 0)	[Adimensional].
$\sigma$ :	Constante de Stefan-Boltzmann	$[\frac{W}{m^2 * K^4}]$ .
D:	Diámetro hidráulico de una tubería	[m].
S:	Factor de Forma de conducción	[m].
$T_i$ :	Temperatura del Agua al Ingreso	[°C].
$T_E$ :	Temperatura del Agua al Retorno	[°C].
$f$ :	Factor de Fricción de Darcy-Weisbach	[Adimensional].
Vel:	Velocidad	[m/s].
<b>• DISEÑO ELECTRÓNICO.</b>		
$\phi$ :	Ángulo de Disparo	[rad].
$V_m$ :	Amplitud de la Señal de Voltaje	[V].
R:	Resistencia Eléctrica	[ $\Omega$ ].
C:	Capacitor	[F].
P:	Potencia Activa Disipada	[W].
I:	Corriente Continua o Eficaz	[A ó mA].

V:	Voltaje Continuo o Eficaz	[V ó mV].
$\omega$ :	Frecuencia angular	$[\frac{rad}{s}]$ .
$\omega_d$ :	Frecuencia natural amortiguada	$[\frac{rad}{s}]$ .
$\omega_s$ :	Frecuencia angular de Muestreo	$[\frac{rad}{s}]$ .
$\xi$ :	Factor de amortiguamiento relativo	[Adimensional].
$S_{1,2}$ :	Polos deseados en Tiempo Continuo.	
$Z_{1,2}$ :	Polos deseados en Tiempo Discreto.	
$T_s$ :	Periodo de Muestreo y/o Tiempo Muerto o de Retardo	[s].

#### **CAPÍTULO IV:**

$X_{UUT}$ : Medición realizada por el UUT.

$Y_{MTE}$ : Medición realizada por el MTE.

$\delta$ : Resultado de Calibración (Estimación del  $e_{b,UUT}$ ).

$\epsilon_{cal}$ : Error en la Calibración (Error en la estimación de  $e_{b,UUT}$ ).

$e_{b,UUT}$ : Error Sistemático (de sesgo o bias) del UUT.

$e_{b,MTE}$ : Error Sistemático (de sesgo o bias) del MTE.

$e_{m,MTE}$ : Error en la Medición realizada por el MTE.

$e_{m,UUT}$ : Error en la Medición realizada por el UUT.

$e_{Otros,UUT}$ : Errores que Componen al  $e_{m,UUT}$ , sin contar  $e_{b,UUT}$ .

$e_{Otros,MTE}$ : Errores que Componen al  $e_{m,MTE}$ , sin contar  $e_{b,MTE}$ .

$\mu(x)$ : Incertidumbre en la medición "x".

#### **ABREVIATURAS GENERALES:**

- **UNIDADES.**

[W]: Watts.

[J]: Joules.

[s]: Segundos.

[Kg]: Kilogramo Masa.

[K]: Grados Kelvin (Temperatura Absoluta).

[°C]: Grados Centígrados (Temperatura).

[m]: Metros.

[cm]: Centímetros.

[mm]: Milímetros.

[Lt]; Litro.

[V]: Voltios.

[A]: Amperios.

[ $\Omega$ ]: Ohms.

[uF]: Microfaradios.

[LSB]: Número de bits menos significativos (ADC).

- **ACRÓNIMOS.**

UCSM: Universidad Católica de Santa María.

PID: Proporcional – Integral – Derivativo..

MTE: Measurement and Test Equipment o Equipo de Medición de Referencia.

UUT: Unit Under Test o Instrumento a Evaluar/Calibrar.

OP AMP: Amplificador Operacional.

ZOH: Retén de Orden Cero.

## CAPÍTULO I: MARCO METODOLÓGICO

### 1. Identificación de la Problemática

Los sistemas de climatización por suelo radiante poseen marcadas ventajas sobre otros sistemas de climatización, debido a factores como su bajo consumo energético, su alta sinergia con el uso de energías renovables y su compatibilidad con la salubridad (Uponor, 2013). No obstante, los sistemas por superficies radiantes son considerados una tecnología innovadora ya que, ya no existen los limitantes tecnológicos que impedían su estandarización siendo, en la actualidad, su aplicación factible. Por ello, es importante facilitar la inclusión de este sistema de climatización en el mercado y para ello, se deben realizar actividades divulgativas y formativas para promulgar dichas innovaciones (Fegeca & Fenercom, 2017).

Siguiendo este contexto, el laboratorio de termo-fluidos de la Universidad Católica de Santa María, no cuenta con un módulo experimental referente a sistemas de climatización por superficies radiantes, del cual se podría sacar ventaja para analizar los principios termodinámicos que ocurren en dichos sistemas de climatización, además de promover su uso mediante un enfoque práctico que complemente la información teórica, y con ello, dar a conocer sus ventajas.

Es por ello que surge la propuesta de implementar un módulo educativo de climatización por suelo radiante, al cual se le dio la facultad de operar el módulo de manera manual y de forma computarizada, para de esa manera hacer hincapié en la importancia de los sistemas de control en los sistemas de climatización, en este caso, por suelo radiante. Con ello, se espera que el módulo sea de utilidad y del interés de los estudiantes de pregrado de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Mecánica-Eléctrica y Mecatrónica.

## 2. Justificación

Debido a la extensión y el relieve topográfico del Perú, es que contamos con una vasta diversidad climática. Es por ello que en el Perú existen zonas meteorológicas en donde la temperatura desciende drásticamente en invierno, como ocurre en la sierra sur del país.

Bajo este contexto, surgió la motivación de buscar otros medios de calefacción más eficientes, ya que los sistemas convencionales actúan únicamente sobre la temperatura del aire, generando una sensación de poco confort y consumiendo, a su vez, muchos recursos energéticos (REHAU, 2019). El resultado de ello, es la presente tesis como una propuesta ante las circunstancias mencionadas, enfocada en resolver la problemática de la inexistencia de un módulo experimental para promover y realizar actividades formativas del uso de un sistema de calefacción por suelo radiante por agua.

Dicho ello, para justificar la realización de la presente tesis se evaluará su relevancia tanto científica como social.

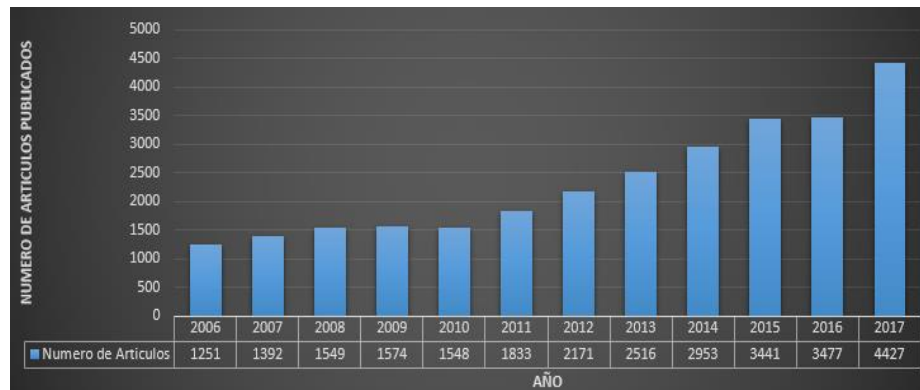
### 2.1 Relevancia Científica

Durante la última década, en ámbitos generales, se han establecido normativas mucho más estrictas en términos de eficiencia energética y compatibilidad ecológica, dando como resultado en el sector de climatización a un incremento en la investigación y mejora de métodos alternativos a los convencionales, como lo es el suelo radiante (Fegeca & Fenercom, 2017).

Esto se evidencia con el número de artículos de investigación publicados cada año en revistas científicas o sitios web de investigación. Para evidenciar ello, se recolectó datos pertinentes del sitio web de investigación ScienceDirect los cuales se muestran en la Figura 1, ilustrando el evidente incremento de investigaciones respecto al suelo radiante y ratificando así sus buenos prospectos a futuro.

**Figura 1**

*Artículos de Investigación sobre suelo radiante anuales en ScienceDirect*



Fuente: <https://www.sciencedirect.com/search/advanced?q=under-floor%20heating>

Por ello, con el desarrollo de la presente tesis se busca contribuir a la formación y divulgación de este sistema de climatización innovador, que en un futuro puede reemplazar a los sistemas de climatización convencionales. Con ello, el impacto científico que se espera de la presente tesis es el de brindar una ayuda complementaria para la comprensión de los principios bajo los cuales se rige el funcionamiento de una superficie radiante, ya que, para el diseño de un sistema de suelo radiante, es necesario seguir la normativa UNE-EN 1264 la cual ofrece una metodología de diseño que requiere se tenga un conocimiento previo del funcionamiento y los factores que intervienen en un suelo radiante.

## **2.2 Relevancia Social**

Diversos estudios han demostrado que el sistema de suelo radiante brinda al cuerpo humano un confort y bienestar superiores respecto a los tradicionales sistemas de calefacción garantizando temperaturas constantes y uniformes en cada habitación, todo ello sumado a la mayor eficiencia energética de este tipo de sistemas de climatización hace que su aplicación esté conforme a las normativas que regulan el ahorro energético, impacto ecológico, y salubridad en el confort (Fegeca & Fenercom, 2017). Debido a esto, el impacto social esperado de la presente tesis es la promulgación de este sistema de climatización, con sus beneficios tales como su bajo consumo

energético y su compatibilidad con energías renovables, con lo cual se espera mejorar la calidad de vida en zonas climáticas extremas del Perú.

### **3. Objetivos**

#### ***3.1 Objetivo General***

- Desarrollar un módulo experimental de un sistema de calefacción por suelo radiante por agua, con fines educativos para visualizar y analizar sus parámetros de funcionamiento y características, implementado para el laboratorio de termofluidos de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Mecánica-Eléctrica y Mecatrónica de la Universidad Católica de Santa María.

#### ***3.2 Objetivos Específicos***

- Elaborar el diseño mecánico del sistema de calefacción por suelo radiante por agua del módulo, realizando el dimensionamiento de sus componentes.
- Diseñar e integrar un sistema electrónico al módulo, de manera que su manipulación pueda ser manual mediante interruptores o controlado por una computadora mediante una interfaz de usuario.
- Realizar el diseño y la implementación de un controlador digital PID en su forma modificada PI-D, para regular la temperatura del agua del tanque de suministro cuando el módulo se controle mediante una computadora.
- Calibrar el sistema de medición de temperatura desarrollado en el diseño electrónico, llevando a cabo un análisis de incertidumbre en la medición de temperatura de dicho sistema que interactúa con el microcontrolador.

#### 4. Hipótesis

Dado que los sistemas de climatización por suelo radiante proyectan a establecerse en el mercado del sector de climatización debido a sus pronunciadas ventajas, a la factibilidad tecnológica actual y a la mayor rigidez de normativas energéticas y ecológicas que cumple (Fegeca & Fenercom, 2017), es muy probable que la implementación de un módulo experimental de dicho sistema en la Universidad Católica de Santa María ayude a promover, familiarizar y explicar el principio de funcionamiento de un suelo radiante por agua a los estudiantes de pregrado de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Mecánica-Eléctrica y Mecatrónica.

#### 5. Alcances y Limitaciones

- Al ser un módulo experimental con fines educativos, principalmente por el tamaño del mismo, existen limitantes constructivas y de aplicabilidad de recomendaciones propuestas por la norma UNE EN 1264 para el diseño del suelo radiante a escala real. Por lo tanto, se realizó el diseño mecánico del suelo radiante por agua del módulo utilizando un enfoque analítico, aplicando conceptos de transferencia de calor, prescindiendo del procedimiento propuesto por la norma UNE EN 1264. Sin embargo, si se tomaron en cuenta, en la medida de lo posible, recomendaciones propuestas por diversos manuales de diseño de suelo radiante basados en la norma UNE EN 1264.
- El módulo se implementó de manera que pueda ser manipulado tanto manualmente (mediante interruptores, botones y displays) como operado mediante una computadora, a través de una interfaz de usuario (maestro) que sostiene una comunicación serial con el microcontrolador Atmega328p (esclavo).

- El controlador digital PID diseñado para controlar la temperatura del agua de abastecimiento del módulo, solamente entrará en funcionamiento cuando el módulo se opere mediante una computadora y, por lo tanto, que el módulo sea controlado por el microcontrolador utilizado. Cuando el módulo sea operado manualmente y, por ende, el sistema electrónico del módulo (incluyendo el microcontrolador) estén desconectados, dicha temperatura será controlada por un termostato manual.
- El módulo de climatización por suelo radiante por agua se diseñó para que trabaje solamente en modo de calefacción, aunque es posible utilizar el mismo sistema para la refrigeración, sin embargo, la presente tesis no abarca esa funcionalidad.
- Se desarrolló el módulo de manera que solo se tomó en cuenta el efecto que tiene el suelo radiante sobre la temperatura interior del recinto y de la superficie del suelo, y, por lo tanto, no se controla ni monitorea la humedad relativa o absoluta del aire interior ni la renovación de aire.
- La característica que se pretende mostrar experimentalmente con el presente módulo, es la inercia térmica propia de superficies radiantes. Por lo tanto, si bien se puede utilizar el módulo para evaluar el rendimiento del sistema de calefacción utilizando otros fluidos, u otros materiales que mejoren la conductividad térmica alrededor de la red de tuberías, en la presente tesis solo se consideraron pruebas experimentales que monitoreen las temperaturas pertinentes, registrando el aumento de temperatura interior al iniciar el sistema, y también registrando el retardo que existe en el descenso de temperatura al apagar el sistema y abrir la tapa de la cámara de pruebas renovando el aire interior por aire frío.

## CAPÍTULO II: MARCO TEORICO

### 1. Sistemas de Climatización por Superficies Radiantes

Son sistemas de calefacción y/o refrigeración que emplean los alrededores de un recinto (techo, suelo y/o paredes) como fuentes emisoras de temperatura para proporcionar un incremento del calor o frío, dependiendo del objetivo de la climatización. Este método de climatización es conocido como superficies radiantes, ya que transfieren calor mediante radiación principalmente debido a que el área del suelo, pared o techo es grande en relación con la habitación a climatizar, lo que conlleva a que una mayor parte de la radiación emitida incida sobre los alrededores de la habitación (Uponor, 2013). Al ser la mayor parte de transferencia de calor en estos sistemas, por radiación, se consigue una mayor eficacia en la climatización del recinto, ya que el intercambio energético por radiación depende de la cuarta potencia de las temperaturas absolutas de los cuerpos, logrando así un incremento mucho mayor de la transferencia de calor al aumentar  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  la temperatura de la superficie radiante que el que se obtiene al incrementar  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  la temperatura interior del aire. De esa manera, las superficies radiantes no requieren trabajar a una alta temperatura (Fegeca & Fenercom, 2017).

#### *1.1 Calefacción por Suelo Radiante*

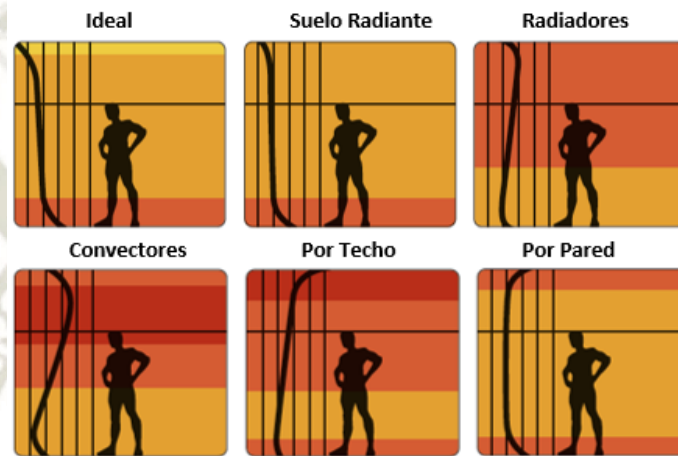
La principal característica que diferencia a un sistema de suelo radiante con otras superficies radiantes como el techo y las paredes u otros métodos de calefacción, es que mediante el suelo radiante se consigue el perfil de temperatura óptimo para el confort de las personas (Uponor, 2013). Esto es debido a que el calor en los pies de una persona produce un mayor bienestar mientras que el calor en la cabeza produce malestar.

En un sistema de calefacción convencional como los radiadores se tiene un área pequeña, pero a alta temperatura, lo que se traduce en una transferencia de calor mayoritaria por convección,

con la cual se calienta el aire (no teniendo una temperatura uniforme), el cual calienta a las personas. En cambio, en un sistema de superficie radiante, si se tiene al suelo como superficie radiante, se consigue un perfil de temperatura más próximo al ideal.

**Figura 2**

*Perfil de Temperatura de Distintos Métodos de Calefacción*



*Fuente:* Manual Técnico de Climatización Invisible, UPONOR (2013).

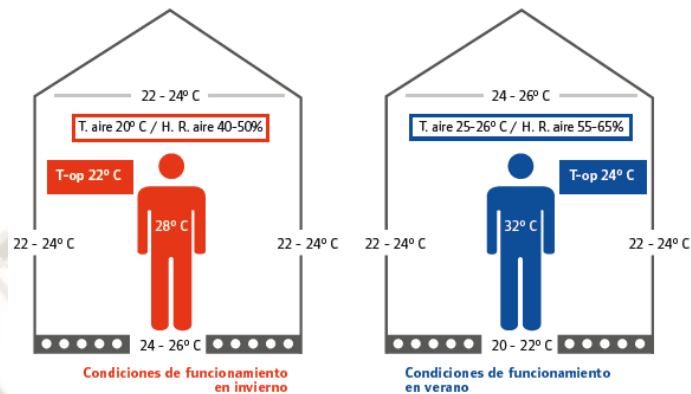
**1.2 Principio de Funcionamiento del Suelo Radiante**

El principio bajo el cual se basa la climatización por suelo radiante, es que la temperatura percibida por una persona (denominada temperatura operativa), depende tanto de la temperatura de bulbo seco del aire como de la temperatura radiante media de las superficies interiores. El valor de la temperatura operativa se puede aproximar mediante el promedio de ambas temperaturas cuando la diferencia entre éstas es menor a 4 °C y la velocidad del aire es menor a 2 m/s (Uponor, 2013).

Bajo esa premisa, para evitar que la temperatura operativa de un recinto aumente en verano debido al aumento de la temperatura del aire interior, bastaría con reducir la temperatura radiante de las superficies interiores del recinto. Del mismo modo, para evitar que la temperatura operativa disminuya en invierno debido a la disminución de la temperatura del aire interior, se necesita elevar la temperatura radiante de las superficies internas del recinto.

**Figura 3**

*Variación de la Temperatura Operativa en un Recinto Cerrado*

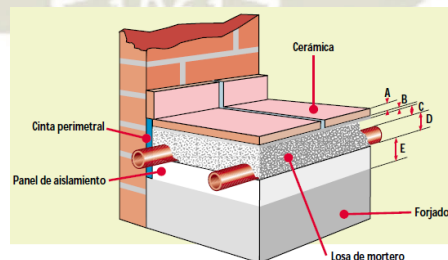


*Fuente:* Manual Técnico de Climatización Invisible, UPONOR (2013).

Para conseguir aumentar la temperatura de una superficie del recinto, en este caso, el suelo, se puede hacer por medio de una red de tuberías embebidas al interior de dicha superficie, por las que circula agua caliente. De esta manera, en un sistema de suelo radiante se impulsa agua a una temperatura baja entre 35 °C y 45 °C para calefacción y 16 °C para refrigeración a través de circuitos de tuberías que se encuentran enterradas en el suelo del recinto (Fegeca & Fenercom, 2017; Uponor, 2013).

**Figura 4**

*Instalación de un Sistema de Suelo Radiante*



*Fuente:* Industrial Blansol, Suelo Radiante BARBI.

### **1.3 Características Relevantes de una Instalación de Suelo Radiante**

- **La Inercia Térmica de las Superficies Radiantes.**

Los materiales utilizados en la construcción del recinto, y en este caso del suelo, poseen una capacidad calorífica alta, lo que se traduce en que la variación de temperatura de la superficie

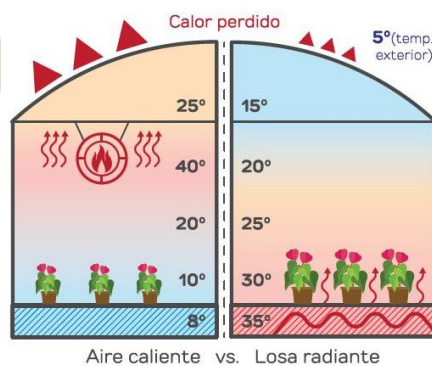
radiante sea lenta, y por ende se cuenta con un efecto de amortiguación o retardo respecto a la disminución de la temperatura operativa del recinto cuando se apague el sistema, ya que el tiempo transitorio de conducción de calor dura más para alcanzar el estado estacionario. Esto disminuye notablemente el consumo de energía del sistema ya que a mayor inercia térmica tenga el recinto, mayor estabilidad térmica se tendrá.

- **Climatización sin Movimiento de Aire (Sin Estratificación del Aire).**

Dado que un sistema de calefacción por suelo radiante trabaja a bajas temperaturas, la diferencia entre la temperatura del aire y de la superficie radiante es pequeña, la cual no es suficiente para inducir corrientes fuertes de convección natural. La mayor consecuencia de esto es que, a diferencia de otros métodos de climatización convectivos, no se da la estratificación del aire caliente en el recinto, que es cuando el aire caliente se acumula en las zonas del techo del recinto y el aire frío queda en las zonas bajas. De esta manera es que se consigue una temperatura uniforme.

### Figura 5

*Efecto de la Ausencia de la Estratificación del Aire*



Fuente: Recuperado de: <http://agrosuelo.com.ar/calefaccion-de-invernaderos/>

- **Bajo Consumo Energético**

Otra consecuencia de trabajar a bajas temperaturas, es que el sistema de calefacción por suelo radiante es compatible con energías renovables para el calentamiento del agua, por ejemplo,

el calentamiento del agua mediante paneles solares. Además, al no calentar el aire interior del recinto, se reducen las pérdidas de calor hacia el exterior debido a la menor diferencia entre las temperaturas interior y exterior.

#### ***1.4 Sectores de Aplicación de un Sistema de Climatización por Suelo Radiante***

Según ALB Sistemas S.A. (2017), dado que la versatilidad de un sistema de suelo radiante permite su uso tanto para calefacción como para refrigeración en distintos sectores como lo son la calefacción residencial e industrial, la climatización dentro de invernaderos y otras instalaciones agrícolas o de crianza de ganado.

#### ***1.5 Antecedentes de Módulos Experimentales de Suelo Radiante***

En el presente apartado, se procede a revisar investigaciones previas sobre la implementación de módulos experimentales de sistemas de climatización por suelo radiante. Esto con el fin de tener referencias para la implementación del módulo en la presente tesis, de manera que éste sea lo más estandarizado posible, y de esa manera, poder tener una mayor flexibilidad al realizar las pruebas experimentales del funcionamiento del módulo.

Díaz & Tinta, (2017) presentaron en su tesis titulada “Diseño y Construcción de un Módulo Experimental de Suelo Radiante a Energía Solar” un módulo de 0.6 m x 1 m de área de suelo radiante, desarrollado para la Universidad Nacional de San Antonio de Abad, Cusco.

#### **Figura 6**

*Módulo Experimental Desarrollado por Díaz & Tinta (2017)*



*Fuente:* Diseño y Construcción de un Módulo Experimental de Suelo Radiante a Energía Solar, Universidad Nacional de San Antonio de Abad, Cuzco (Díaz & Tinta, 2017).

Berrio Huarahuara & Hanco Mamani, (2017) presentaron su tesis titulada “Diseño de un Prototipo de Calefacción por  $m^2$  de Superficie de Piso Radiante utilizando PCMS Aprovechando la Energía Solar Térmica en la Ciudad de Puno”, en la cual construyeron un módulo experimental de suelo radiante para la Universidad Nacional del Altiplano, Puno, para evaluar la mejora en la eficiencia de dicho sistema utilizando materiales de cambio de fase (PCM) anular a las redes de tubería del suelo radiante.

### Figura 7

*Módulo Experimental Desarrollado por Berrio & Hanco*



*Fuente:* Diseño de un Prototipo de Calefacción por  $m^2$  de Superficie de Piso Radiante utilizando PCMS Aprovechando la Energía Solar Térmica en la Ciudad de Puno, Universidad Nacional del Altiplano, Puno (Berrio & Hanco, 2017).

Marrero Marín, (2009) presentó en su tesis titulada “Calefacción Mediante Suelo Radiante” para la Universidad Pontificia Comillas, España, el desarrollo de un módulo experimental de suelo radiante, el cual incluía la automatización de dicho módulo.

### Figura 8

*Módulo Experimental Desarrollado por Marrero Marin*



*Fuente:* Calefacción Mediante Suelo Radiante, Universidad Pontificia Comillas, Madrid – España (Marrero Marín, Julio 2009).

## 2. Mecanismos de Transferencia de Calor

Según Ghajar & Cengel., (2011) la transferencia de calor es una interacción energética con una masa dada, en donde la fuerza impulsora de dicha interacción es una diferencia de temperatura. En cuanto al calor, se entiende que es un concepto que abarca a las formas de energía interna sensible y latente, llamadas también energía térmica. Aclarado ello, la transferencia de energía térmica o “calor” siempre se produce desde el medio de mayor temperatura hacia el de menor temperatura, y ésta para cuando se alcanza el equilibrio térmico. Para ello, el calor se puede transferir en tres formas diferentes, conducción, convección y radiación, pudiendo existir a lo mucho, dos mecanismos de transferencia de calor simultáneamente, o bien conducción o convección junto con la radiación.

### 2.1 Transferencia de Calor por Conducción

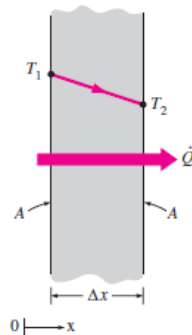
Es la transferencia de energía térmica de las partículas más energéticas hacia las menos energéticas que están en contacto dentro un medio. Por ello, la conducción puede darse en sólidos, líquidos y gases. En los sólidos la conducción de calor se da por las vibraciones de las moléculas y el transporte de energía por los electrones, mientras que en los líquidos y gases se da conducción solamente cuando éstos no tienen un movimiento macroscópico, es decir el fluido esta estático, ya que la conducción se da en este caso por el movimiento aleatorio de las moléculas en el fluido estático (Ghajar & Cengel., 2011). La razón de conducción de calor por conducción obedece la ley de Fourier de la conducción, la cual se expresa de la siguiente forma:

$$Q_{cond} = -k * A * \frac{dT}{dx}$$

Donde K es la conductividad térmica del medio ( $\frac{W}{m \cdot K}$ ), A es el área perpendicular a la dirección de transferencia de calor ( $m^2$ ) y  $\frac{dT}{dx}$  es la gradiente de temperatura en la dirección “x” como se muestra en la Figura 9.

**Figura 9**

*Conducción de Calor a Través de un Medio*



*Fuente:* Transferencia de Calor y Masa, Fundamentos y Aplicaciones (Ghajar y Cengel, 2011).

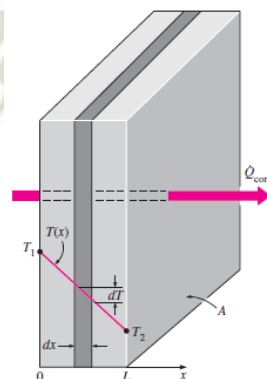
El signo negativo en la ecuación de Fourier es para que se obtenga una transferencia de calor positiva en la dirección “x” positiva.

- **Conducción de Calor Estacionaria en una Pared Plana.**

La conducción de calor a través de un medio plano, en el cual no existe generación de calor interna, en el cual se ha alcanzado el estado estacionario, y a su vez se considera unidimensional, se puede obtener resolviendo la ecuación de conducción de Fourier, considerando a la razón de transferencia de calor ( $\dot{Q}$ ) constante.

**Figura 10**

*Conducción de Calor Estacionaria por un Medio Plano*



*Fuente:* Transferencia de Calor y Masa, Fundamentos y Aplicaciones (Ghajar y Cengel, 2011).

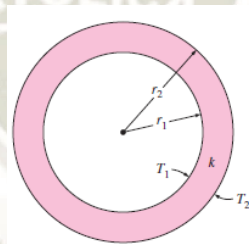
$$\int_{x=0}^L \dot{Q} * dx = - \int_{T=T_1}^{T_2} k * A * dT \rightarrow \dot{Q} (W) = k * A * \frac{T_1 - T_2}{L}$$

- **Conducción de Calor Estacionaria en un Medio Cilíndrico.**

La conducción de calor a través de un medio cilíndrico en el cual no existe generación de calor interna, y además se han alcanzado condiciones estacionarias considerando el flujo de calor unidimensional, se puede obtener al resolver la ecuación de conducción de Fourier considerando la razón de transferencia de calor ( $\dot{Q}$ ) constante.

**Figura 11**

*Conduccion Estacionaria de Calor por un Medio Cilindrico*



*Fuente:* Transferencia de Calor y Masa, Fundamentos y Aplicaciones (Ghajar y Cengel, 2011).

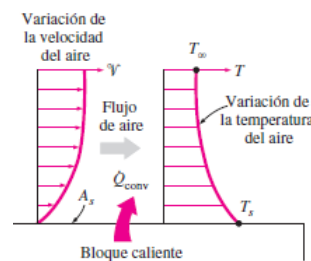
$$\int_{r=r_1}^{r_2} \frac{\dot{Q}}{A} * dr = \int_{T=T_1}^{T=T_2} k * dT \rightarrow \text{Donde: } A = 2\pi rL \rightarrow \dot{Q} (W) = 2\pi Lk * \frac{T_1 - T_2}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} (W)$$

**2.2 Transferencia de Calor por Convección**

Este mecanismo de transferencia de calor se da entre un sólido y un fluido adyacente que puede ser líquido o gaseoso que está en movimiento, por lo que la convección puede ser vista como un caso especial de la conducción en donde el fluido está en movimiento y mejora la conducción. En ausencia de cualquier movimiento la transferencia de calor entre el sólido y el fluido se daría solo por conducción pura (Ghajar & Cengel., 2011). De esta manera, la razón de transferencia de calor por convección obedece la ley de enfriamiento de Newton, la cual estipula que la razón de transferencia de calor es proporcional al área ( $A_s$ ), al coeficiente de convección ( $h$ ) y a la diferencia de temperatura entre la superficie del sólido y la temperatura del fluido suficientemente alejada de la superficie.

**Figura 12**

*Variación de Temperatura y Velocidad del Fluido en la Convección*



*Fuente:* Transferencia de Calor y Masa, Fundamentos y Aplicaciones (Ghajar y Cengel, 2011).

$$\dot{Q}(W) = h * A_S * (T_S - T_{\infty})$$

Donde  $h$  ( $\frac{W}{m^2 * K}$ ) es el coeficiente de convección,  $A_S$  es el área superficial en  $m^2$ ,  $T_s$  es la temperatura de la superficie y finalmente  $T_{\infty}$  es la temperatura del fluido lo suficientemente alejado de la superficie como para que ésta tenga algún efecto sobre el fluido en movimiento.

La convección puede ser natural o forzada, es decir, puede que el movimiento del fluido sea inducido naturalmente por las variaciones en la densidad del fluido por las diferencias de temperatura o por algún elemento externo como un ventilador o una bomba hidráulica.

### **2.3 Transferencia de Calor por Radiación**

Es la transmisión de energía mediante ondas electromagnéticas, las cuales son generadas por cargas aceleradas y corrientes cambiantes. En particular la radiación térmica es aquella generada por el constante movimiento de los átomos, electrones y moléculas de los sólidos, líquidos y gases que se encuentran a una temperatura por encima del cero absoluto. La radiación térmica de un objeto a temperaturas inferiores a 1000 K, se emite en una longitud de onda infrarroja, por lo que no es visible, y a partir de los 1000 K arriba se empieza a percibir el color rojizo cuando se calienta mucho un cuerpo, ya que empieza a emitir en la zona visible de radiación (Ghajar & Cengel., 2011). Para un objeto de área pequeña en relación con el área que lo rodea

totalmente encerrándolo, la transferencia de calor entre el objeto pequeño y la superficie que lo rodea se da por  $Q_{rad}(W) = \varepsilon * \sigma * A_s * (T_s^4 - T_{alrededores}^4)$ .

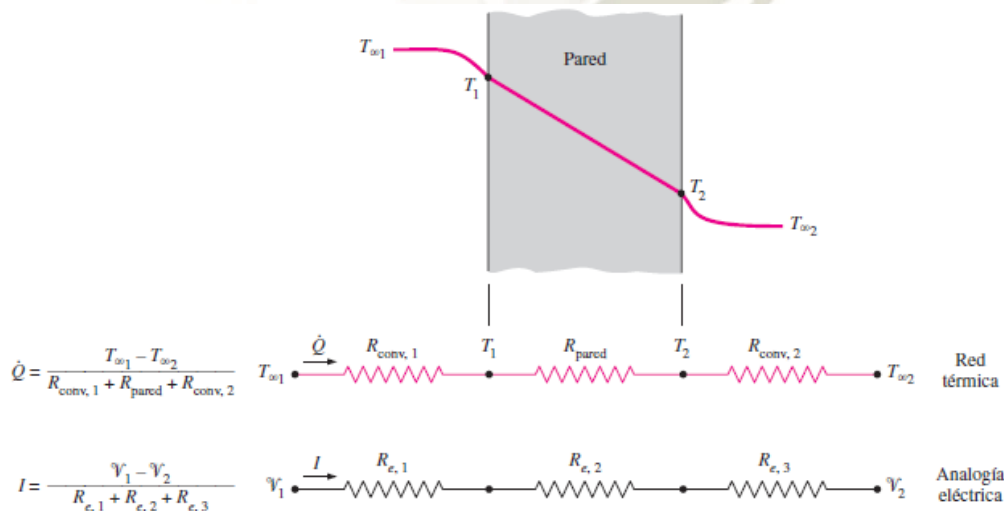
Donde  $\varepsilon$  es la emisividad del objeto pequeño que está rodeado por los alrededores,  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann ( $5.67 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 * K^4}$ ),  $A_s$  es el área superficial del objeto pequeño,  $T_s$  es la temperatura de la superficie del objeto pequeño y  $T_{alrededores}$  es la temperatura isotérmica equivalente de los alrededores que rodean al objeto pequeño.

### 2.4 Concepto de Resistencia Térmica en Transferencia de Calor Estacionaria

Al analizar la transferencia de calor en sistemas de estado estacionario, en donde la razón de transferencia de calor  $\dot{Q}$  es constante, y no existe generación de calor en el medio (transferencia de energía como trabajo) se puede trabajar con la analogía eléctrica de la ley de Ohm, donde la diferencia de potencial es la diferencia de temperatura, la corriente es la razón de transferencia de calor y la resistencia eléctrica es la resistencia térmica.

**Figura 13**

*Analogía Eléctrica en el Análisis de Transferencia de Calor Estacionario sin Generación de Calor*



Fuente: Transferencia de Calor y Masa, Fundamentos y Aplicaciones (Ghajar y Cengel, 2011).

## CAPÍTULO III: DISEÑO E INGENIERIA

### 1. Diseño Mecánico

Como se mencionó en los alcances de la presente tesis, al tratarse de un módulo experimental con fines educativos, el tamaño del mismo deberá ser compacto y por esa razón, existen limitantes constructivas y de aplicabilidad con respecto a una instalación de suelo radiante en un recinto a escala real. Por este motivo, el diseño mecánico de la instalación de suelo radiante del módulo será de manera analítica aplicando conceptos de transferencia de calor, ya que el procedimiento de diseño recomendado por la norma UNE EN 1264 contempla instalaciones a escala real, sin embargo se tomó como referencia, en la medida de lo posible, parámetros de diseño recomendados para instalaciones de suelo radiante estipuladas por diversos fabricantes de este tipo de sistema de calefacción, que se están basados dicha normativa.

#### *1.1 Parámetros de la Cámara de Pruebas del Módulo*

- **Dimensiones de la Cámara de Pruebas.**

Dado que es deseable que el módulo ocupe el menor espacio posible, manteniendo su correcta funcionalidad y operabilidad, se decantó por que la cámara de pruebas tenga una forma de una caja rectangular, cuyas dimensiones interiores del suelo sean de 60 cm por 40 cm, mientras que la altura interior de las paredes sea de 40 cm, ello sin la instalación del suelo radiante. Seguidamente se debe mantener un equilibrio entre un buen aislamiento térmico de la cámara de pruebas, y el espesor de cada superficie, ya que no es deseable que el módulo ocupe un gran espacio. Dicho ello, se decidió usar como material de construcción 3 planchas sucesivas de aglomerado de madera de 15 cm de espesor, recubiertas de melamina, ya que son valores comerciales fácilmente encontrados en el mercado local. Por ende, cada superficie tiene un espesor de 45 cm de aglomerado de madera (paredes, techo y base de la cámara de pruebas).

- **Ventana de Hoja Doble de Acrílico.**

En una pared lateral se incorporó una ventana de hoja doble de acrílico de 3 mm de espesor con una separación de una cámara de aire de 10 mm de espesor, ya que con espesores de cámaras de aire menores a 13 mm no producen corrientes de convección y por ende mejoran el aislamiento térmico (Handbook of Fundamentals, ASHRAE, como se citó en Ghajar & Cengel., 2011). Las dimensiones de la ventana cubren casi la totalidad de la pared (60 cm por 30 cm), esto con el fin de poder visualizar el posicionamiento de los sensores interiores o posibles fallas al interior de la cámara de pruebas.

- **Red de Tuberías de Agua Caliente del Suelo Radiante.**

Las tuberías utilizadas para la instalación del suelo radiante en la cámara de pruebas del módulo deben ser de un diámetro pequeño, ya que, al ser el área del suelo reducida por el hecho de ser un módulo experimental, se debe dar prioridad a tuberías que permitan un radio de curvatura pequeño de manera que la red de tuberías recorra la mayor extensión del suelo posible sin fallas mecánicas (Centro Español de Información del Cobre [CEDIC], 2009).

Aclarado ello, las tuberías del suelo radiante bajo las cuales se realizó el diseño son de cobre flexible, de un diámetro nominal de 3/8 de pulgada, con un diámetro interior de 7.9 mm y un diámetro exterior de 9.5 mm, ya que el cobre tiene una alta conductividad térmica y es de fácil adquisición en el mercado local con un bajo costo.

- **Aislamiento Térmico Descendente de la Cámara de Pruebas.**

Para garantizar una mayor eficiencia energética del sistema de calefacción por suelo radiante por agua, Uponor (2013), basándose en la norma UNE EN 1264, recomienda unos niveles de resistencia térmica mínima que debe tener el panel aislante en la base de la red de tuberías del suelo radiante, como se muestra en la Tabla 1.

**Tabla 1**

*Resistencia Térmica Descendente Recomendada para Suelo Radiante*

	Habitación calentada inferiormente	Habitación no calentada o calentada intermitentemente por debajo o directamente en el terreno*	Temperatura del aire exterior debajo		
			Temperatura exterior de diseño o nominal $T_d \geq 0^\circ \text{C}$	Temperatura exterior de diseño o nominal $0^\circ \text{C} > T_d \geq -5^\circ \text{C}$	Temperatura exterior de diseño o nominal $-5^\circ \text{C} > T_d \geq -15^\circ \text{C}$
Resistencia Térmica ( $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ )	0,75	1,25	1,25	1,5	2,0

Fuente: Manual Técnico de Climatización Invisible por Suelo Radiante, UPONOR (2013)

Dado que el módulo estará en el laboratorio de termo-fluidos de la UCSM, se considera que no existirán excesivas pérdidas térmicas por lo que se toma el caso de que de menor resistencia térmica requerida ( $0.75 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$ ). El material seleccionado como aislante térmico para la base de la cámara de pruebas del módulo es el poliestireno expandido que contribuirá al aislamiento térmico proporcionado por la base de aglomerado de madera, materiales cuyas conductividades térmicas son  $k_{PE} = 0.040 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$  y  $k_{AM} = 0.14 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$  respectivamente (Ghajar & Cengel., 2011). Al estar las resistencias térmicas del aglomerado de madera ( $R_{AM}$ ) y del poliestireno expandido ( $R_{PE}$ ) en serie, tenemos que la resistencia térmica descendiente total ( $R_{TD}$ ) es:

$$R_{TD} = 0.75 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} = R_{AM} + R_{PE} = \frac{0.045 (m)}{0.14 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}} + \frac{L_{PE} (m)}{0.040 \left(\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}\right)}$$

Espesor Poliestireno Expandido =  $L_{PE} = 0.017 \text{ m} = 17 \text{ mm} \approx \mathbf{20 \text{ mm}}$  (espesor comercial)

- **Material del Suelo que Emula al Mortero de Cemento.**

Dado que el mortero utilizado en este sistema de climatización consiste de una mezcla principalmente compuesta de cemento (50 Kg.), arena (220 Kg.), agua de amasado (20 – 25 Litros) y otros aditivos (0.3 Kg), en donde la arena es el componente de mayor proporción en dicha mezcla (Uponor, 2013), se seleccionó la arena como material que emulará al mortero que recubre la red de tuberías del suelo radiante, ya que al ser el componente con mayor aporte a la mezcla del mortero, las características térmicas de la arena se asemejarán más a las características de la mezcla

de mortero. En cuanto al espesor de la capa de arena, se recomienda que la altura del mortero por encima de la generatriz de la red de tuberías de agua caliente este como mínimo entre los 50 mm y los 30 mm para, de esa manera obtener una buena inercia térmica y a su vez pueda resistir los esfuerzos de carga sobre el suelo (Fegeca & Fenercom, 2017; Uponor, 2013). Bajo este contexto, para mantener un equilibrio entre la inercia térmica y la rapidez con la que se alcanza el régimen estacionario, se utilizó un espesor de 40 mm de arena sobre la generatriz superior de la red de tuberías del suelo radiante.

### Figura 14

*Distribución de los Materiales Base del Suelo Radiante del Módulo*



Fuente: Elaboración Propia.

### 1.2 Cálculo del Sistema de Suelo Radiante en la Cámara de Pruebas del Módulo

Para el cálculo del sistema de suelo radiante en la cámara de pruebas del módulo, se fija como parámetro de diseño que la temperatura operativa interior sea de 20 °C, ya que dicho valor es el recomendado para el diseño de suelo radiante en modo calefacción (Fegeca & Fenercom, 2017; Uponor, 2013). Además, para que el incremento de temperatura sea notorio, se calcularán las pérdidas térmicas de la cámara de pruebas de manera que se tenga un salto térmico de 10 °C entre la temperatura operativa interior y exterior de la cámara.

Finalmente, se toma como límite superior la temperatura del suelo interior de la cámara de pruebas (superficie de arena), como 29 °C ya que es lo recomendado en instalaciones a escala real

por cuestiones de confort (Norma UNE EN 1264, como se citó en Fegeca & Fenercom, 2017; Uponor, 2013).

### **1.2.1 Verificación del Aislamiento Térmico de la Cámara de Pruebas del Módulo**

Primero se procede a verificar si el nivel de aislamiento térmico de la cámara de pruebas del módulo es el adecuado como para cumplir con los parámetros de diseño impuestos para el cálculo del sistema de calefacción de suelo radiante.

#### ***1.2.1.1 Cálculo de las Pérdidas Térmicas de la Cámara de Pruebas.***

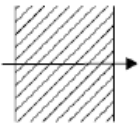
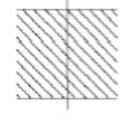
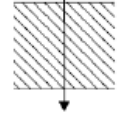
Para el cálculo de las pérdidas térmicas de la cámara de pruebas, se tomaron solo en cuenta las pérdidas de calor transmitidas a través de las superficies de la misma, descartando así pérdidas de calor por renovación de aire o infiltraciones ya que la cámara de pruebas es hermética y no existe renovación de aire interior. Seguidamente, es necesario definir las dimensiones de cada superficie de la cámara de pruebas, teniendo en cuenta que las dimensiones interiores de la cámara de pruebas sin el sistema de calefacción instalado, son de 60 cm x 40 cm de base y una altura interior de 40 cm. Sin embargo, al incluir 20 mm de espesor de poliestireno expandido y 50 mm de espesor de una capa de arena (40 mm sobre la generatriz superior de las tuberías de 9.5 mm de diámetro exterior), se tiene que la altura de las paredes interiores de la cámara de pruebas se reduce a 33 cm de altura.

Para la obtención de las resistencias térmicas de las superficies interiores y exteriores de la cámara de pruebas por convección y radiación ( $R_{Si}$  y  $R_{Se}$  respectivamente) se recurrió a los datos experimentales provistos por el Código Técnico de Edificación (CTE) en su Documento Básico de Ahorro Energético como se muestra en la Tabla 2, notando que las resistencias térmicas proporcionadas incluyen tanto los efectos de convección como radiación (DA-DB HE/1, Ahorro Energético, CTE, 2015).

**Tabla 2**

*Resistencias térmicas de superficies interiores y exteriores en cerramientos*

**1 Resistencias térmicas superficiales de cerramientos en contacto con el aire exterior en  $m^2 \cdot K / W$**

Posición del cerramiento y sentido del flujo de calor	$R_{se}$	$R_{si}$
Cerramientos verticales o con pendiente sobre la horizontal $>60^\circ$ y flujo Horizontal 	0,04	0,13
Cerramientos horizontales o con pendiente sobre la horizontal $\leq 60^\circ$ y flujo ascendente (Techo) 	0,04	0,10
Cerramientos horizontales y flujo descendente (Suelo) 	0,04	0,17

*Fuente:* Documento de Apoyo al Documento Básico DB-HE Ahorro de energía, Cálculo de parámetros característicos. Código Técnico de Edificación [CTE], 2015.

Dado que el recinto contará también con una ventana de acrílico de hoja doble, también se utilizarán los datos proporcionados por el Código Técnico de Edificación, en su Documento Básico de Ahorro Energético para la obtención de la resistencia térmica de la cámara de aire en la ventana de hoja doble ( DA-DB HE/1, Ahorro Energético, CTE, 2015).

**Tabla 3**

*Resistencia térmica de cámaras cerradas de aire sin ventilar*

**2 Resistencias térmicas de cámaras de aire en  $m^2 \cdot K / W$**

e (cm)	Sin ventilar	
	horizontal	vertical
1	0,15	0,15
2	0,16	0,17
5	0,16	0,18

*Fuente:* Documento de Apoyo al Documento Básico DB-HE Ahorro de energía, Cálculo de parámetros característicos. Código Técnico de Edificación [CTE], 2015.

Finalmente, es necesario contar con las propiedades térmicas de los materiales utilizados en el recinto. Por lo tanto se utilizarán las propiedades de los materiales utilizados a una temperatura de 300 K como se especifican en (Ghajar & Cengel., 2011).

**Tabla 4**

*Propiedades de los Materiales de la Cámara de Pruebas del Módulo*

Material	Conductividad Térmica “k” (W/m*K)	Emisividad a 300K (ε)
Aglomerado de Madera	0.14	0.9
Poliestireno Expandido	0.04	-
Arena	0.2 – 1.0 (Se toma el valor promedio de 0.6)	0.9
Acrílico	0.19	0.9

Fuente: Transferencia de Calor y Masa, Fundamentos y Aplicaciones, Ghajar & Cengel (2011).

- **Razón de Pérdida de Calor a Través del Techo de la Cámara de Pruebas.**

La transferencia de calor a través del techo de la cámara de pruebas consta de 3 resistencias térmicas en serie, la de la superficie interior ( $R_{si}$ ), la del aglomerado de madera ( $R_{AM}$ ) y la de la superficie exterior ( $R_{se}$ ).

$$R_{TECHO} \left( \frac{m^2 * K}{W} \right) = R_{si} + R_{AM} + R_{se} = 0.10 \frac{m^2 * K}{W} + \frac{0.045 m}{0.14 \frac{W}{m * K}} + 0.04 \frac{m^2 * K}{W} = \mathbf{0.461} \frac{m^2 * K}{W}$$

Además, teniendo en cuenta que, según los parámetros de diseño fijados, la temperatura operativa interior es de 20 °C y la exterior de 10 °C, y que el área interna del techo es de 60 cm x 40 cm, tenemos que la pérdida de calor en estado estacionario se calcula como:

$$q_{TECHO} \left( \frac{W}{m^2} \right) = \frac{20^{\circ}C - 10^{\circ}C}{0.461 \frac{m^2 * K}{W}} = 21.69 \frac{W}{m^2} \rightarrow Q_{TECHO} (W) = 21.69 \frac{W}{m^2} * (0.6 m * 0.4 m) = \mathbf{5.2 W}$$

Por lo tanto, la razón de pérdida de calor a través del techo del recinto es de **5.2 W**.

- **Razón de Pérdida de Calor a Través de la Pared Trasera del Recinto**

La altura interior todas las paredes de la cámara de pruebas es de 33 cm, y en el caso de la pared trasera, ésta tiene un ancho de 60 cm. Con ello, la resistencia térmica de la pared trasera está dada por:

$$R_{PARED.T} = R_{si} + R_{AM} + R_{se} = 0.13 \frac{m^2 * K}{W} + \frac{0.045 m}{0.14 \frac{W}{m * K}} + 0.04 \frac{m^2 * K}{W} = \mathbf{0.492} \frac{m^2 * K}{W}$$

Con ello, la pérdida de calor a través de la pared trasera se calcula como:

$$q_{PARED.T} \left( \frac{W}{m^2} \right) = \frac{20^\circ C - 10^\circ C}{0.492 \frac{m^2 * K}{W}} = 20.3 \frac{W}{m^2} \rightarrow Q_{PARED.T}(W) = 20.3 \frac{W}{m^2} * (0.6 m * 0.33 m) = 4.02 W$$

Por ende, la razón de pérdida de calor a través de la pared trasera del recinto es **4.02 W**.

- **Razón de Pérdida de Calor a Través de las Paredes Laterales**

La altura interior de las paredes de la cámara de pruebas es de 33 cm, mientras que el ancho de las paredes laterales es de 40 cm. Dado que el espesor y el material de las paredes laterales del recinto es el mismo que en el de la pared trasera, se tiene que la resistencia térmica por unidad de área es la misma que la resistencia térmica de la pared trasera ( $0.492 \frac{m^2 * K}{W}$ ).

Al ser la única variación con respecto a la pared trasera del recinto, el área de la pared, tenemos que las pérdidas de calor por cada pared lateral son de:

$$q_{PARED.L} \left( \frac{W}{m^2} \right) = 20.3 \frac{W}{m^2} \rightarrow Q_{PARED.L} = 20.3 \frac{W}{m^2} * (0.4 m * 0.33 m) = 2.68 \frac{W}{\text{por pared lateral}}$$

Dado que son dos paredes laterales iguales, la razón de pérdida de calor a través de ambas paredes laterales es de **5.36 W**.

- **Razón de Pérdida de Calor a Través de la Ventana de Acrílico de Hoja Doble**

Dado que las dimensiones de la ventana de hoja doble de acrílico es de 60 cm x 30 cm, y que prácticamente cubre toda el área de la pared frontal de la cámara de pruebas, se tomará un enfoque conservador y se considerará que la ventana de acrílico abarca toda el área de la pared frontal del recinto, es decir, tiene una altura interior de 33 cm y un ancho de 60 cm.

$$R_{VENTANA} \left( \frac{m^2 * K}{W} \right) = R_{si} + R_{AC1} + R_{AIRE} + R_{AC2} + R_{se}$$

$$R_{Ventana} \left( \frac{m^2 * K}{W} \right) = 0.13 \frac{m^2 * K}{W} + \frac{0.003 m}{0.19 \frac{W}{m * K}} + 0.15 \frac{m^2 * K}{W} + \frac{0.003 m}{0.19 \frac{W}{m * K}} + 0.04 \frac{m^2 * K}{W} = 0.352 \frac{m^2 * K}{W}$$

$$q_{Ventana} \left( \frac{W}{m^2} \right) = \frac{20^\circ C - 10^\circ C}{0.352 \frac{m^2 * K}{W}} = 28.4 \frac{W}{m^2} \rightarrow Q_{Ventana}(W) = 28.4 \frac{W}{m^2} * (0.6 m * 0.33 m) = 5.62 W$$

Por lo tanto, se perderá calor a través de la ventana a una razón de **5.62 W**.

- **Razón de Pérdida de Calor a Través del Suelo del Recinto**

El suelo del recinto está compuesto por una capa de arena, una capa de poliestireno expandido y la base hecha de aglomerado de madera, por ello, la resistencia térmica del suelo está compuesta por la resistencia térmica de la superficie interior ( $R_{si}$ ), la resistencia de la capa de arena ( $R_{AR}$ ), la resistencia de la capa de poliestireno expandido ( $R_{PE}$ ), la resistencia del aglomerado de madera ( $R_{AM}$ ) y la resistencia de la superficie exterior ( $R_{se}$ ).

$$R_{SUELO} \left( \frac{m^2 * K}{W} \right) = R_{si} + R_{AR} + R_{PE} + R_{AM} + R_{se}$$

$$R_{SUELO} = 0.17 \frac{m^2 * K}{W} + \frac{0.05 m}{0.6 \frac{m * K}{W}} + \frac{0.02 m}{0.04 \frac{m * K}{W}} + \frac{0.045 m}{0.14 \frac{m * K}{W}} + 0.04 \frac{m^2 * K}{W} = 1.11 \frac{m^2 * K}{W}$$

$$q_{SUELO} \left( \frac{W}{m^2} \right) = \frac{20 \text{ }^\circ\text{C} - 10 \text{ }^\circ\text{C}}{1.11 \frac{m^2 * K}{W}} = 9.01 \frac{W}{m^2} \rightarrow Q_{SUELO}(W) = 9.01 \frac{W}{m^2} * (0.6 m * 0.4 m) = 2.16 W$$

Por lo tanto, la razón de pérdida de calor a través del suelo del recinto es de **2.16 W**.

- **Carga Térmica Total del Recinto (Pérdidas Totales).**

La razón de pérdida de calor a través de todo el recinto es la suma de las pérdidas de calor por cada superficie del recinto, de manera que la carga térmica total (C.T.) del recinto es:

$$C.T. = \text{Techo} + \text{Pared Trasera} + 2 * \text{Pared Lateral} + \text{Ventana} + \text{Suelo}$$

$$C.T. = 5.2 W + 4.02 W + 2 * 2.68 W + 5.62 W + 2.16 W = 22.36 W$$

### 1.2.1.2 Cálculo del Calor Suministrado por el Suelo a 29 °C

Una vez obtenida la razón de pérdida de calor del recinto bajo las condiciones de diseño, se procede a comprobar si el aislamiento del recinto es el adecuado como para cumplir con los parámetros de diseño, y para ello, se calculó el suministro de calor entregado por el suelo radiante cuando éste está activo a su máxima temperatura de operación fijada en los parámetros de diseño. Para ello, es necesario calcular la razón de calor suministrado por la superficie radiante tanto por convección como por radiación.

- **Suministro de Calor por Radiación del Suelo Radiante a 29°C.**

Primero se procede a calcular las temperaturas de las superficies interiores de la cámara de pruebas, ya que se cuenta con la razón de pérdida de calor por cada superficie tomando como referencia que el suelo se encuentra en su temperatura máxima permisible de 29 °C.

**Tabla 5**

*Calculo de las Temperaturas Superficiales Interiores del Recinto*

Superficie	Temperatura Operativa ( $T_{OP}$ )	Flujo de Pérdida de Calor ( $q_P$ )	Resistencia Térmica Unitaria Superficial (R) (Tabla 6)	Temperatura Superficial ( $T_S$ ) ( $q_P = \frac{T_{OP}-T_S}{R}$ )
Techo	20 °C	21.69 W/m <sup>2</sup>	0.10 m <sup>2</sup> *K/W	<b>17.8 °C</b>
Pared Trasera	20 °C	20.3 W/m <sup>2</sup>	0.13 m <sup>2</sup> *K/W	<b>17.4 °C</b>
Ventana	20 °C	28.4 W/m <sup>2</sup>	0.13 m <sup>2</sup> *K/W	<b>16.3 °C</b>
Pared Lateral 1	20 °C	20.3 W/m <sup>2</sup>	0.13 m <sup>2</sup> *K/W	<b>17.4 °C</b>
Pared Lateral 2	20 °C	20.3 W/m <sup>2</sup>	0.13 m <sup>2</sup> *K/W	<b>17.4 °C</b>
Suelo	-	-	-	<b>29 °C</b>

Fuente: Elaboración Propia.

Para el cálculo de la temperatura radiante media que ve el suelo del recinto, se puede aproximarse mediante el promedio aritmético de las temperaturas superficiales ponderadas por su área (Uponor, 2013), tenemos que la temperatura media radiante que ve el suelo de la cámara de

pruebas es se pueda calcular mediante  $T_{MR} = \frac{\sum T_S * Areas}{Area_{Total}}$ .

Teniendo en cuenta que son 5 las superficies que rodean al suelo, y que, por ende, toda la radiación emitida por el suelo se distribuye entre las 5 superficies, tenemos que la temperatura media radiante de los alrededores con respecto al suelo es:

$$T_{MR_{SUELO}} = \frac{17.8°C * 0.24m^2 + 17.4°C * 0.198m^2 + 16.3°C * 0.198m^2 + 2 * 17.4°C * 0.132m^2}{0.24m^2 + 2 * 0.198m^2 + 2 * 0.132m^2} = 17.3 °C$$

Con ello, calculamos la razón de transferencia de calor por radiación ( $\dot{Q}_{S_{RAD}}$ ) a través del cual el suelo radiante suministra al interior de la cámara de pruebas.

$$\dot{Q}_{S_{RAD}} (W) = \varepsilon_{suelo} * A_{suelo} * \sigma * (T_{suelo}^4 - T_{MR_{SUELO}}^4)$$

$$\dot{Q}_{S_{RAD}} (W) = 0.9 * 0.24m^2 * 5.67 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 * K^4} * ((29 + 273K)^4 - (17.3 + 273K)^4) = 14.9 W$$

- **Suministro de Calor por Convección Natural del Suelo Radiante a 29°C.**

Para hallar la razón de transferencia de calor por convección natural desde el suelo radiante hacia el interior de la cámara de pruebas, es necesario calcular el coeficiente de convección natural ( $h_{conv}$ ) para lo cual se debe calcular el número de Nusselt (Nu) evaluando las propiedades del aire a la temperatura promedio entre la temperatura del suelo y la temperatura del aire al interior de la cámara de pruebas ( $\frac{29^\circ\text{C}+20^\circ\text{C}}{2}$ ).

**Tabla 6**

*Propiedades del Aire a 24.5 °C y 1 atm*

<b>Propiedades del Aire a <math>\frac{29^\circ\text{C}+20^\circ\text{C}}{2} = 24.5^\circ\text{C} = 297.5\text{ K}</math> y 1 atm</b>	
Coefficiente de expansión volumétrica $\beta$	$1/297.5\text{ K}^{-1}$
Viscosidad cinemática ( $\nu$ )	$1.557 \cdot 10^{-5}\text{ m}^2/\text{s}$
Numero de Prandtl (Pr, Adimensional)	0.7297
Conductividad Térmica del Aire ( $k_{aire}$ )	0.02547 W/m*K

*Fuente:* Transferencia de Calor y Masa, Fundamentos y Aplicaciones. Ghajar & Cengel (2011).

Seguidamente, debido a la orientación geométrica del suelo, se tiene que el caso de estudio de transferencia de calor por convección natural corresponde al equivalente a una placa de superficie superior caliente en un medio más frío.

Utilizando las fórmulas experimentales propuestas en Ghajar & Cengel (2011), para el cálculo del número de Nusselt, se procede a calcular la longitud característica (Lc) y el número de Rayleigh (Ra).

$$L_c = \frac{A_{\text{suelo}}}{\text{perimetro}_{\text{suelo}}} = \frac{0.6\text{ m} * 0.4\text{ m}}{2 * 0.6\text{ m} + 2 * 0.4\text{ m}} = 0.12\text{ m}; \quad Ra = \frac{g * \beta * (T_{\text{superficie}} - T_{\text{aire}}) * L_c^3 * Pr}{\nu^2}$$

Donde  $\beta$  es el coeficiente de expansión volumétrica del fluido, y en el caso del aire (tratado como gas ideal) equivale a la inversa de la temperatura (en K), mientras que Pr es el número de Prandtl, g es el valor de la gravedad y “ $\nu$ ” es la viscosidad cinemática del fluido.

$$Ra = \frac{9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * \frac{1}{297.5\text{ K}} * (29 + 273\text{ K} - 20 + 273\text{ K}) * (0.12\text{ m})^3 * 0.7297}{(1.557 * 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}})^2} = 1543602.261 \approx 1.5 * 10^6$$

Con estos datos, procedemos a calcular el número de Nusselt con la siguiente expresión:

$$Nu = 0.54 * Ra^{\frac{1}{4}} \rightarrow \text{para } 10^4 < Ra < 10^7 \dots (OK) \rightarrow Nu = 0.54 * 1543602.261^{\frac{1}{4}} = \mathbf{19.03}$$

Seguidamente se puede calcular el coeficiente de convección natural.

$$h_{conv} = \frac{Nu * k_{aire}}{L_C} = \frac{19.03 * 0.02547 \frac{W}{m * K}}{0.12 m} \rightarrow h_{conv} = \mathbf{4.04 \frac{W}{m^2 * K}}$$

Con ello, la razón de transferencia de calor proporcionada por el suelo radiante hacia el interior del recinto, por convección natural ( $\dot{Q}_{S_{Conv}}$ ) es:

$$\dot{Q}_{S_{Conv}}(W) = h_{conv} * A_{suelo} * (T_{suelo} - T_{aire}) = 4.04 \frac{W}{m^2 * ^\circ C} * 0.24 m^2 * (29^\circ C - 20^\circ C) \rightarrow \dot{Q}_{S_{Conv}} = \mathbf{8.7 W}$$

- **Suministro de Calor Total hacia el Interior de la Cámara de Pruebas.**

Una vez calculado la razón de transferencia de calor tanto por convección como por radiación que proporciona el suelo radiante, es posible calcular la razón de transferencia de calor total proporcionada por el suelo radiante ( $\dot{Q}_S$ ).

$$\dot{Q}_S(W) = \dot{Q}_{S_{RAD}} + \dot{Q}_{S_{Conv}} = \mathbf{8.7 W + 14.9 W = 23.6 W} \rightarrow \mathbf{23.6 W \geq C.T (22.36 W) \dots \dots (OK)}$$

Donde se observa que la razón de transferencia de calor suministrada por el suelo radiante bajo condiciones de diseño, es mayor que las pérdidas de calor de la cámara de pruebas, con lo cual el sistema si será posible de mantener dichas condiciones.

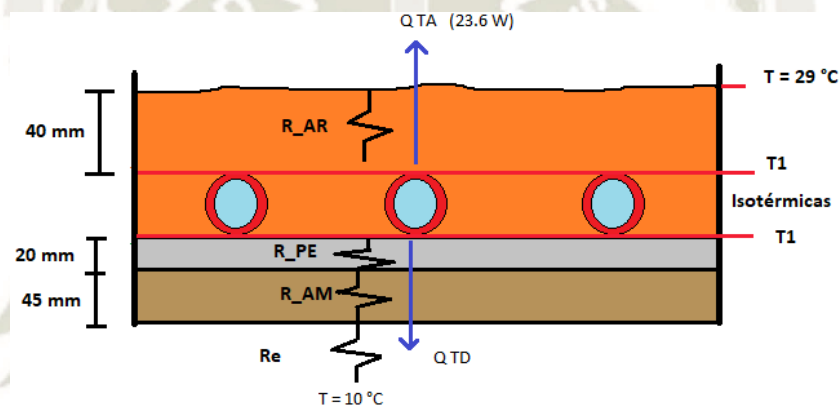
### 1.2.2 Cálculo de la Potencia Total Entregada por la Red de Tuberías

Siguiendo la suposición de conducción de calor unidimensional, bajo la cual se realiza el diseño del suelo radiante, se puede considerar que la razón de transferencia de calor suministrada por la red de tuberías enterradas bajo el suelo se divide en dos porciones. Una porción de calor tiene la dirección ascendente ( $\dot{Q}_{TA}$ ), ascendiendo hacia la superficie del suelo a una temperatura superficial máxima de 29 °C bajo las condiciones de diseño. La segunda porción de calor tiene la dirección descendente ( $\dot{Q}_{TD}$ ), ya que parte del calor suministrado por la tubería descenderá en dirección al aislamiento sobre la base (poliestireno expandido). Para el cálculo de dichas razones

de transferencia de calor (ascendente y descendente), se considera que la temperatura del suelo solo varía con la profundidad y es isotérmica a una profundidad dada, así, la temperatura necesaria de la capa de arena que se encuentra en la generatriz superior de la red de tuberías (40 mm de profundidad) para que haya una transferencia de calor ascendente de 23.6 W cuando la temperatura superficial del suelo es de 29 °C será la misma temperatura que la parte exterior de la red de tuberías considerándose ésta, isotérmica también.

**Figura 15**

*Esquema de la Distribución de Calor Entregado por la Red de Tuberías de Agua Caliente*



Fuente: Elaboración Propia.

Donde  $R_{AR}$  es la resistencia térmica de la capa de arena sobre la red de tuberías, mientras que  $R_{PE}$ ,  $R_{AM}$ , y  $R_e$  son las resistencias térmicas del poliestireno expandido, de la base del recinto de aglomerado de madera y la resistencia superficial de la base del recinto.

Con estos datos, podemos calcular la temperatura de la capa de arena en contacto con la red de tuberías de cobre, y con dicha temperatura, calcular las pérdidas de calor descendente ya que la transferencia de calor ascendente ya se conoce (23.6 W).

$$\dot{Q}_{TA} = \frac{T_{AR_{Tubo}} - 29\text{ °C}}{R_{AR}} \rightarrow T_{AR_{Tubo}} = \dot{Q}_{TA} * R_{AR} + 29\text{ °C} = 23.6\text{ W} * \frac{0.04\text{ m}}{0.6 \frac{\text{W}}{\text{m} * \text{°C}} * 0.24\text{ m}^2} + 29\text{ °C} = 36\text{ °C}$$

$$\dot{Q}_{TD} = \frac{T_{AR_{Tubo}} - 10\text{ °C}}{R_{PE} + R_{AM} + R_e} = \frac{36\text{ °C} - 10\text{ °C}}{\frac{0.02\text{ m}}{0.04 \frac{\text{W}}{\text{m} * \text{°C}} * 0.24\text{ m}^2} + \frac{0.045\text{ m}}{0.14 \frac{\text{W}}{\text{m} * \text{°C}} * 0.24\text{ m}^2} + \frac{0.04 \frac{\text{m}^2 * \text{°C}}{\text{W}}}{0.24\text{ m}^2}} = 7.2\text{ W}$$

Por lo tanto, la potencia total entregada por las tuberías de agua caliente ( $\dot{Q}_T$ ), es la suma de la potencia ascendente entregada hacia el suelo del interior del recinto y la potencia descendente perdida hacia los cimientos del recinto.

$$\dot{Q}_T = \dot{Q}_{TA} + \dot{Q}_{TD} = 23.6 \text{ W} + 7.2 \text{ W} = 30.8 \text{ W}$$

Por lo tanto, la red de tuberías debe proporcionar un total de 30.8 W de potencia, ya que 7.2 W serán pérdidas hacia la base del recinto.

### 1.2.3 Longitud de Tubería de Cobre Flexible en la Cámara de Pruebas

Para calcular la longitud de la tubería a utilizar es necesario elegir un distanciamiento entre tuberías (“paso”) de los recomendados para la instalación de un suelo radiante, siendo el valor de los pasos entre tuberías más habituales para la calefacción de 20 cm, 15 cm y 10 cm (Uponor, 2013), y una vez seleccionado el paso entre tuberías, se puede calcular la longitud de la tubería dividiendo el área del suelo entre dicho paso. Dado que el sistema radiante está implementado en un módulo experimental, se selecciona el paso más pequeño sugerido (10 cm).

$$\text{Por ende, la longitud de tubería necesaria es de } L \text{ (m)} = \frac{A \text{ (m}^2\text{)}}{\text{paso (m)}} = \frac{0.24 \text{ m}^2}{0.1 \text{ m}} = 2.4 \text{ m.}$$

Seguidamente, se procede a calcular la temperatura isotérmica de la red de tuberías necesaria para brindar la potencia total entregada por el sistema de suelo radiante previamente calculada con una longitud de tubería de 2.4 m. Para ello, si bien las tuberías están rodeadas por materiales distintos en la dirección ascendente como descendente, se considera que la tubería está rodeada por un solo material (la capa de arena), ya que es el material que rodea a la red de tuberías por la parte ascendente, siendo de mayor interés la transferencia de calor ascendente.

Dado que la transferencia de calor entre la red de tuberías y la capa de arena es bidimensional, se utiliza el factor de forma “S” de conducción para calcular la razón de

transferencia de calor total entre la superficie del suelo y la red de tuberías propuesto en Ghajar & Cengel (2011). De esta manera, la temperatura isotérmica de la tubería debe ser la siguiente.

$$\dot{Q}_T = 30.8 \text{ W} = S * k_{AR} * (T_1 - T_2)$$

$$\dot{Q}_T = 30.8 \text{ W} = \frac{2\pi * 2.4 \text{ m}}{\ln\left(\frac{4 * 0.04475 \text{ m}}{0.0095 \text{ m}}\right)} * 0.6 \frac{\text{W}}{\text{m} * ^\circ\text{C}} * (T_{\text{Tubo}} - 29^\circ\text{C}) \rightarrow T_{\text{Tubo}} = 39^\circ\text{C}$$

**Figura 16**

*Distribución de Tubería Utilizada en el Módulo*



*Fuente:* Elaboración Propia.

#### **1.2.4 Caudal de Agua y Temperatura de Impulsión del Agua**

Al contar ya con el diámetro de la red de tuberías del suelo radiante (3/8'' nominal), para determinar el caudal de trabajo del módulo es necesario fijar una velocidad de trabajo del flujo de agua. Dicho ello, la velocidad máxima de trabajo en este tipo de sistemas viene regulada por una caída de presión por metro de tubería menor a 40 mm.c.a para poder seleccionar bombas hidráulicas de bajo consumo en el caso de circuitos largos (CEDIC, 2009; IDAE, 2008). En el caso de circuitos cortos en donde la potencia de la bomba hidráulica no sea una limitante, se recomienda que la velocidad máxima del agua no sobrepase los 2 m/s en tuberías metálicas, ya que a dichas velocidades se empieza a percibir ruidos y vibraciones (Documento Básico de Salubridad DB-HS, CTE, 2007).

Considerando que se trata de un módulo experimental, y que por ende el circuito hidráulico no tendrá limitantes en cuanto a la potencia de la bomba hidráulica al ser un circuito corto, se toma

como la velocidad máxima de trabajo del módulo de 2 m/s. Con ello, el caudal máximo de trabajo del módulo ( $\dot{V}$ ) será de:

$$\dot{V} = \frac{Vel * \pi * Di^2}{4} = \frac{2 \frac{m}{s} * \pi * (0.0079 m)^2}{4} = 98.0 * 10^{-6} \frac{m^3}{s} = 0.0980 \frac{litros}{s} = 5.88 \frac{litros}{min} = 353.0 \frac{litros}{h}$$

Una vez definido el caudal de trabajo del módulo, es necesario obtener las propiedades del agua a la temperatura promedio entre la entrada y salida de la red de tuberías del sistema radiante, para con esos datos, calcular la temperatura de impulsión del agua del sistema. Dado que se conoce la temperatura de la tubería de 2.4 m de longitud del sistema (39 °C), asumimos que esa es la temperatura promedio entre del agua

**Tabla 7**

*Propiedades del Agua a 39 °C*

Propiedad a 39 °C	Valor
Densidad $\rho$	992.5 Kg/m <sup>3</sup>
Viscosidad Dinámica $\mu$	0.667 * 10 <sup>-3</sup> Kg/m*s
Viscosidad Cinemática $\nu$ ( $\mu/\rho$ )	0.672 * 10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s
Conductividad Térmica k	0.630 W/m*K
Numero de Prandtl Pr	4.42
Calor específico C <sub>p</sub>	4179 J/Kg*K

*Fuente:* Transferencia de Calor y Masa, Fundamentos y Aplicaciones. Gjahar & Cengel (2011).

Al ser la red de tuberías un circuito corto, no habrá una caída de temperatura grande entre el agua de ingreso y retorno del sistema de calefacción, y por ende, asumimos que la temperatura de la superficie de la tubería permanece constante en el valor de 39 °C, lo cual implica que la variación de temperatura del agua al circular por la red de tuberías, sea exponencial.

Contamos con la transferencia de calor total otorgado por la tubería de agua caliente ( $\dot{Q}_T = 30.8 W$ ), con la velocidad del agua (Vel = 2 m/s) y con la temperatura constante en la superficie de la red de tuberías ( $T_S = 39 °C$ ). Con estos datos podemos calcular la temperatura de impulsión del agua ( $T_i$ ) y la de retorno del agua ( $T_e$ ):

$$\dot{Q}_T = \dot{m} * Cp * (T_i - T_e) = \rho * \dot{V} * Cp * (T_i - T_e)$$

$$\dot{Q}_T = 30.8 \text{ W} = 992.5 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * 98 * 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 4179 \frac{\text{J}}{\text{Kg} * ^\circ\text{C}} * (T_I - T_E) \rightarrow (T_I - T_E) = 0.076 ^\circ\text{C}$$

Del mismo modo, la potencia total entregada por la tubería de agua puede ser calculada tomando en cuenta el coeficiente de transferencia de calor por convección del agua hacia la tubería isotérmica.

$$\dot{Q}_T = 30.8 \text{ W} = h_i * Area * \Delta T_{LM} = h_i * \pi * D_i * L * \Delta T_{LM}$$

Donde  $h_i$  es el coeficiente de convección forzada interna del agua a una temperatura promedio de  $39 ^\circ\text{C}$ ,  $D_i$  es el diámetro interior de la tubería,  $L$  es la longitud de la tubería y  $\Delta T_{LM}$  es la diferencia media logarítmica de temperatura, la cual se obtiene mediante  $\Delta T_{LM} = \frac{T_E - T_I}{\ln \left( \frac{T_S - T_E}{T_S - T_I} \right)}$ , en donde  $T_S$  es la temperatura isotérmica de la tubería.

Por lo tanto, es necesario calcular el coeficiente de convección del agua ' $h_i$ ' a  $39 ^\circ\text{C}$ , de manera que nuestras únicas incógnitas sean la temperatura de impulsión y de retorno del agua.

Para ello se calcula el número de Reynolds como  $Re = \frac{Vel * D_i}{\nu} = \frac{\frac{2 \text{ m}}{\text{s}} * 0.0079 \text{ m}}{0.672 * 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} = 23512$ .

Se tomará un enfoque conservador y se asumirá que, al no ser un flujo laminar, la longitud de la región de entrada térmica es muy corta y, por lo tanto, que todo el fluido esta térmicamente desarrollado en toda la longitud de la tubería en donde el coeficiente de convección del agua ' $h_i$ ' es constante y menor. Por ende, para el cálculo del coeficiente de convección forzada interna  $h_i$ , se realiza el cálculo del número de Nusselt, para lo cual se utilizará la expresión utilizada en Ghajar

& Cengel (2011),  $(Nu = \frac{(\frac{f}{8}) * (Re - 1000) * Pr}{1 + 12.7 * (\frac{f}{8})^{0.5} * (Pr^{\frac{2}{3}} - 1)})$  válida para  $0.5 \leq Pr \leq 2000$  (OK) y para  $3 * 10^3 <$

$Re < 5 * 10^6$  (OK).

Donde " $f$ " es el factor de fricción de Darcy-Weisbach el cual se puede obtener mediante el diagrama de Moody, para ello, se toma a la aspereza de la tubería de cobre de  $\epsilon = 0.0015 \text{ mm}$  y dado que el diámetro interior de la tubería ( $D_i$ ) es de  $7.9 \text{ mm}$ , la relación  $\epsilon/D_i$  tiene un valor

adimensional de 0.00019 con lo cual da un “f” de aproximadamente 0.023. Sin embargo está sujeto a errores de gráficos y por ende se aplicó la relación para tuberías lisas, propuesta en Ghajar & Cengel (2011), válida para  $3000 < Re < 10^6$  (OK) y tuberías lisas ( $\epsilon/Di \approx 0$ ).

$$f = (0.79 * \ln(Re) - 1.64)^{-2} \rightarrow f = (0.79 * \ln(23512) - 1.64)^{-2} = \mathbf{0.0251}$$

Con lo cual se tiene que el número de Nusselt es:

$$Nu = \frac{\left(\frac{0.0251}{8}\right) * (23512 - 1000) * 4.42}{1 + 12.7 * \left(\frac{0.0251}{8}\right)^{0.5} * (4.42^{\frac{2}{3}} - 1)} = \mathbf{141.6}$$

$$hi = \frac{Nu * k}{Di} = \frac{141.6 * 0.630 \frac{W}{m * K}}{0.0079 m} = \mathbf{11293 \frac{W}{m^2 * K}}$$

Por lo tanto, tenemos las siguientes dos ecuaciones que definen la potencia total entregada por las tuberías de agua.

$$(T_I - T_E) = \mathbf{0.076 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

$$\mathbf{30.8 W} = \mathbf{11293 \frac{W}{m^2 * ^\circ\text{C}}} * \pi * \mathbf{0.0079 m} * \mathbf{2.4 m} * \frac{T_E - T_I}{\ln\left(\frac{39^\circ\text{C} - T_E}{39^\circ\text{C} - T_I}\right)}$$

Resolviendo estas dos ecuaciones para las dos incógnitas ( $T_I$  y  $T_E$ ) tenemos que  $T_E = 39.02 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;  $T_I = 39.09 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Por ende, la temperatura de ingreso del agua debe ser de  $39.09 \text{ } ^\circ\text{C}$  para las condiciones más críticas de operación para que se puedan cumplir con los parámetros de diseño bajo los cuales se realizó el diseño del módulo.

### ***1.3 Selección de Componentes Funcionales del Módulo***

Una vez ya se tiene el cálculo del diseño del sistema de calefacción por suelo radiante del módulo, se procede a la selección de los componentes complementarios para el funcionamiento del módulo, los cuales servirán para la operación y monitoreo del módulo.

#### **1.3.1 Componentes de Medición del Módulo**

Se define primero los parámetros físicos del módulo que se van a monitorear, siendo éstos los siguientes: Temperatura del agua del Tanque de Abastecimiento del Módulo, temperatura

interior y exterior de la cámara de pruebas, temperatura de la superficie del suelo radiante, temperatura del agua al ingreso y al retorno de la red de tuberías del suelo radiante, caudal de agua y la presión estática del fluido al ingreso y retorno de la red de tuberías.

Cabe resaltar que, dado que la temperatura exterior del módulo no variará bruscamente debido a que se asume que el módulo estará en un ambiente cerrado, se utilizará el mismo sensor para medir tanto la temperatura exterior como la de la superficie de arena del suelo radiante.

### ***1.3.1.1 Medición de Temperaturas***

Cuando el módulo se esté operando mediante los interruptores manuales (modo manual) la temperatura será regulada por los controladores industriales XMTG-2301-J los cuales son termostatos con un relé interno que miden la temperatura mediante una termocupla tipo J. Se seleccionaron estos controladores debido a que poseen un display que monitorea la temperatura en °C, además de contar con botones manuales para configurar la temperatura deseada a la cual conmutará el relé interno del controlador, sin embargo, solo tienen una precisión de 1 °C. Dicho controlador XMTG-2301-J posee contactos normalmente cerrados y abiertos, además de un termistor interno que mide la temperatura en la junta fría de la termocupla tipo J.

### **Figura 17**

*Controlador Manual de Temperatura XMTG-2301-J*



*Fuente:* <http://dimelectrico.com/manuales/XMTG2301.pdf>

Por otro lado, para cuando se opere el módulo por medio de una computadora mediante la interfaz de usuario diseñada, se tuvo que seleccionar otros sensores de temperatura aparte de las termocuplas tipo J con las que funciona el XMTG-2301-J, debido a que el controlador XMTG-

2301-J no cuenta con un sistema de comunicación con el que se pueda comunicar con la computadora, y por ende, se utilizó el periférico ADC del microcontrolador Atmega328p como dispositivo de adquisición de datos. No se usaron termocuplas debido a que, para su uso, se requiere un sensor de temperatura adicional que mida la temperatura en la junta fría de la termocupla. Por ello, es que se seleccionó el sensor de temperatura LM35 en su empaquetado TO-92 que es más compacto y común, cuyo rango de medición alcanza hasta los 150 °C lo cual es más que suficiente, además de tener un comportamiento lineal.

#### ***1.3.1.2 Medición del Caudal***

Para la selección del instrumento de medición del caudal de agua, se tuvo como criterio el costo, el tamaño, la facilidad de instalación del instrumento de medición y su disponibilidad en el mercado local. Siguiendo este contexto, la alternativa seleccionada fue el uso de un medidor de agua compacto, el cual mide el volumen de agua que circula a través de éste, y, por ende, para medir el caudal de agua es necesario tomar el tiempo con un reloj o cronometro de mano, midiendo así el caudal de forma indirecta.

#### **Figura 18**

*Hidrómetro utilizado para la Medición Indirecta del Caudal*



Fuente: <https://www.sodimac.com.pe/sodimac-pe/product/1053752/medidor-de-agua>

#### ***1.3.1.3 Medición de la Presión Estática***

El objetivo de medir la presión estática al ingreso y retorno del sistema de tuberías del suelo radiante, es el de poder tener un aproximado de las pérdidas primarias y secundarias del circuito

de tuberías del suelo radiante. Dicho ello, para la medición de la presión estática al ingreso y retorno del sistema de tuberías del suelo radiante, se optó por manómetros analógicos.

### **1.3.2 Componentes Funcionales del Módulo**

#### ***1.3.2.1 Tanque de Abastecimiento de Agua del Módulo***

Dado que el circuito hidráulico del módulo es corto, y lo que se quiere es que los componentes complementarios del módulo ocupen el menor espacio posible, se decidió utilizar como reservorio de abastecimiento de agua para el módulo un depósito cilíndrico abierto de capacidad de 20 litros, con un radio de 15 cm y una altura de 30 cm.

#### ***1.3.2.2 Bomba Hidráulica del Módulo***

Bajo el mismo contexto del tamaño reducido de la red de tuberías del módulo, y que es deseable que los componentes complementarios del módulo ocupen poco espacio, se seleccionó la bomba hidráulica Humboldt LRP32-60/180 que tiene tres velocidades. Dicha bomba funciona a 220 V en alterna, con un consumo de corriente máximo de 0.45 A.

### **Figura 19**

*Bomba Humboldt LRP32-60/180 de 3 velocidades*



Fuente: <https://www.linio.com.pe/p/bomba-de-humboldt-circulacion-de-agua-tpujs2>

#### ***1.3.2.3 Resistencias Sumergibles Calefactoras (Terma Eléctrica)***

Dado que el módulo se encontrará en el laboratorio de termo-fluidos de la UCSM, se requiere que éste sea compacto y pueda ser operado en dicho ambiente, por lo tanto, se decidió calentar el agua mediante el uso de energía eléctrica, específicamente haciendo uso de resistencias calefactoras sumergibles pertenecientes a una terma eléctrica. Teniendo como criterio que es

deseable que el agua caliente lo más rápido posible para ahorrar tiempo en las pruebas experimentales, se utilizaron dos resistencias calefactoras sumergibles de 1500 W.

## 2. Diseño Electrónico

El sistema electrónico del módulo incluye los circuitos necesarios para poder manipular los componentes funcionales del módulo mediante una computadora, utilizando una interfaz de usuario en el programa Labview 2018. Asimismo, también se abarca el diseño e implementación de un controlador PID digital para controlar la temperatura del agua del módulo.

### 2.1 Diseño de los Circuitos del Sistema Electrónico del Módulo

Para el desarrollo de los circuitos electrónicos del módulo, tanto de control como de potencia, se procederá a especificar las características pertinentes al desarrollo del hardware del microcontrolador Atmega328p como se muestra en la Tabla 8.

**Tabla 8**

*Características Electricas del Atmega328p*

Característica	Valor Típico para un voltaje de Alimentación de Vcc = 5 V
Máxima Corriente por Pin	40 mA
Maxíma Corriente Total	200 mA
Voltaje por Pin	5 V
Voltaje Mínimo para un 0 Logico (Entradas)	-0.5 V
Voltaje Maximo para un 0 Logico (Entradas)	1.5 V
Voltaje Mínimo para un 1 Logico (Entradas)	3 V
Voltaje Maximo para un 1 Logico (Entradas)	5.5 V
Voltaje Nominal para un 0 Logico (Salidas)	0 V
Voltaje Nominal para un 1 Logico (Salidas)	5 V
Corriente Consumida por Entradas (Alta Impedancia)	1 uA (despreciable)
Impedancia de Entrada del ADC	100 MΩ

*Fuente:* Hoja de Datos Microcontrolador Atmega328p (Atmel Corporation, 2012).

Cuando el microcontrolador Atmega328p esta embebido en una placa Arduino UNO (el cual es el caso de la presente tesis), se cuenta con 20 pines de entrada/salida para propósitos generales de uso, y dado que la corriente máxima total es de 200 mA, la corriente máxima por cada pin es de 10 mA como máximo, sin embargo, se toma como criterio de diseño para los circuitos de control que interactúen con el microcontrolador que la corriente máxima por cada pin del

microcontrolador sea de 1 mA teniendo en cuenta que el voltaje a través de cada pin es de 5 V para representar un 1 lógico y 0 V para un 0 lógico.

### 2.1.1 Circuito de Control de Potencia de las Resistencias Calefactoras Sumergibles

Para controlar la potencia de las resistencias calefactoras de 1500 W cada una, se aplicará la estrategia de control del ángulo de fase de la señal de voltaje, variando de esa manera el voltaje eficaz y la corriente eficaz sobre cada resistencia calefactora. De esta manera, el voltaje efectivo por cada resistencia está regido por la siguiente expresión:

$$V_{RES} (V) = \sqrt{\frac{1}{2\pi} * [\int_{\phi}^{\pi} A^2 * \sin^2(wt) dwt + \int_{\pi+\phi}^{2\pi} A^2 * \sin^2(wt) dwt]} = \sqrt{\frac{A^2}{2\pi} * [\pi - \phi + \frac{\sin(2\phi)}{2}]}$$

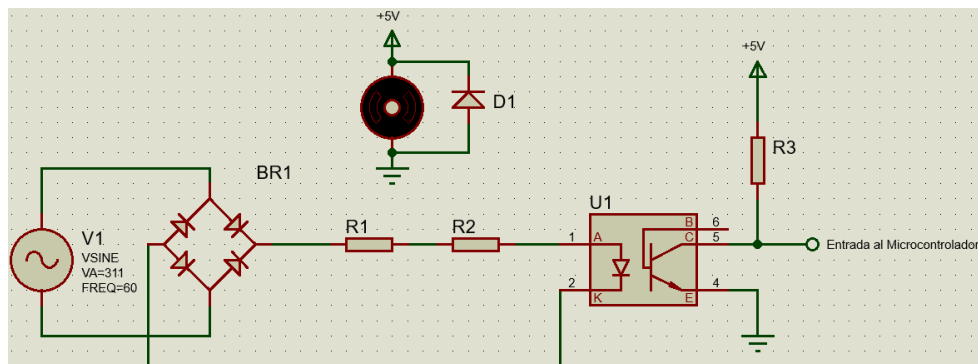
Donde  $\phi$  es el ángulo de disparo en radianes, y A es la amplitud de la señal. Siguiendo este contexto, el control de potencia de las resistencias calefactoras se dividirá en 2 circuitos, uno es el circuito de detección por 0 V de la señal de la red eléctrica, y el otro circuito es el circuito de control del ángulo de disparo para que deje pasar la señal al emitir un pulso de activación.

#### 2.1.1.1 Circuito de Detección de Cruce por Cero

Para el desarrollo del circuito de detección de cruce por cero, es necesario convertir los niveles de voltaje de la red eléctrica a niveles de voltaje que reconozca el microcontrolador (entre 0V y 5V). Se prescindirá del uso de un transformador debido a que éste ocupa mucho espacio.

**Figura 20**

*Esquema del Circuito de Detección de Cruce por Cero*



Fuente: Elaboración Propia.

Los componentes seleccionados y sus características más relevantes para el cálculo de las resistencias del circuito se resumen en la Tabla 9.

**Tabla 9**

*Características Electricas de componentes del circuito de cruce por cero*

Símbolo	Componente	Características
BR1	Puente de Diodos 1W06G	Soporta hasta 1 A de corriente DC rectificada con un voltaje pico de hasta 600 V. Posee una caída de tensión de 1 V por diodo
U1	Optoacoplador 4N35	El led de entrada soporta hasta 60 mA de corriente con una caída de tensión de 1.5 V. El transistor de salida soporta hasta 150 mA de corriente en su colector y soporta hasta 45 V entre el colector y el emisor, además de tener un voltaje colector-emisor de saturación de 0.1 V. El ratio de transferencia de corriente entre la entrada y la salida del optoacoplador (CTR) es de 50 % cuando la corriente en el led de entrada es de 1 mA, y cuando la corriente de entrada es de 10 mA su CTR es del 100 %.
-	Ventilador	Se trabajó con ventiladores de 5 V en continua y con un consumo de corriente de 0.2 A.
D1	Diodo 1N4007	Soporta un máximo de 1 A de corriente media y puede soportar un voltaje efectivo en polarización inversa de hasta 700 V. En su polarización directa consume un voltaje de máximo de 1.1 V.

*Fuente:* Hoja de Datos del 1W06G y 4N35.

Con estos datos, se procede a calcular los valores de las resistencias del circuito, empezando por las resistencias R1 y R2 cuya labor es regular el nivel de corriente a través del led de entrada del optoacoplador 4N35. Para ello se toma como criterio de diseño que la corriente pico máxima a través del led del 4N35 sea de 20 mA para no exigir mucho al componente. Si consideramos ambas resistencias del mismo valor, y las aproximamos al valor comercial más cercano obtenemos:

$$R1 + R2 = \frac{220 V * \sqrt{2} V - 2 * (1 V) - 1.5 V}{20 mA} = 15\ 382\ \Omega \rightarrow R1 = R2 = 8.2\ K\Omega \text{ (Valor Comercial)}$$

El valor de la corriente a través del led de entrada del 4N35 recalculada con los valores de resistencia comerciales es:

$$I_{pico} = \frac{220 V * \sqrt{2} V - 2 * (1 V) - 1.5 V}{2 * (8.2\ K\Omega)} = 18.76\ mA \rightarrow I_{rms} = 13.26\ mA$$

Por lo tanto, la potencia disipada por cada resistencia es de:

$$P_{R1\ y\ R2} = (13.26\ mA)^2 * 8.2\ K\Omega = 1.45\ W\ c/u \approx 2\ W \text{ (Valor Comercial)}$$

Para el cálculo de la resistencia R3, es necesario definir en qué momento se quiere que el transistor del optoacoplador conmute del estado encendido al apagado, lo cual debe suceder cuando la señal de la red se acerque a 0 V. Por ello, se toma como criterio de diseño que el transistor del optoacoplador debe conmutar cuando la señal de voltaje tenga un ángulo de 3° y 177° (ya que es necesario tomar en cuenta un retardo en el tiempo de respuesta del optotransistor y del microcontrolador para que reconozca apropiadamente los niveles de voltaje lógicos), lo cual corresponde a una corriente aproximada a través del led de entrada del 4N35 de:

$$I_{conmutacion} \approx \frac{220 * \sqrt{2} * \text{sen}(3^\circ) V - 2 * (1V) - 1.5 V}{2 * (8.2 K\Omega)} \approx \mathbf{1 mA}$$

De las características del optoacoplador 4N35 se tiene cuando hay una corriente de 1 mA en el led de entrada, su CTR (Current Transfer Ratio) es del 50%, lo que se traduce en una corriente su colector de 0.5 mA, y considerando que el microcontrolador Atmega328p reconoce un nivel lógico alto a partir de los 3 V, el valor de la resistencia R3 se calcula como se muestra.

$$R_3 = \frac{5 V - 3 V}{0.5 mA} = 4000 \Omega \approx \mathbf{3.9 K\Omega (Valor Comercial)}$$

$$P_{R_3} = (0.5 mA)^2 * 3.9 K\Omega = \mathbf{0.975 mW} \approx \frac{1}{4} \text{ Watt (Valor Comercial)}$$

### **2.1.1.2 Circuito de Disparo del Pulso de Activación**

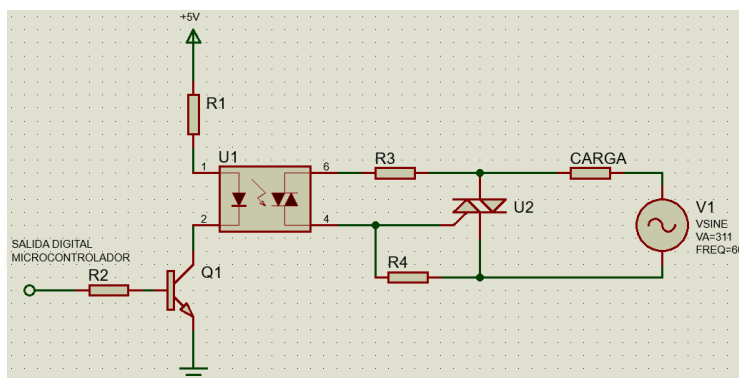
El presente circuito se encarga de generar un pulso de corta duración, de manera que se permita la aplicación del voltaje de la red sobre las resistencias calefactoras solamente después de haber mandado el pulso de activación.

Para seleccionar los componentes a utilizar en este circuito es necesario conocer la cantidad de corriente que demanda las resistencias calefactoras de 1500 W c/u ( $I_{carga} = \mathbf{6.82 A}$ ).

Con ello, al ser el calefactor un elemento resistivo puro, se puede modelar a la carga como una resistencia de valor  $R_{carga} = \frac{(220 V)^2}{1500 W} = \mathbf{32.3 \Omega} \approx \mathbf{33 \Omega}$ .

**Figura 21**

*Esquema del Circuito de Control de Angulo de Fase*



Fuente: Elaboración Propia.

Para el cálculo de las resistencias, se seleccionaron los siguientes componentes.

**Tabla 10**

*Componentes del Circuito Control Angulo de Fase y sus Características*

Símbolo	Componente	Característica
Q1	Transistor BJT tipo NPN 2N3904	Soporta hasta una corriente de 100 mA en el colector, y un voltaje colector-emisor máximo de 40 V. Posee una ganancia (Hfe) mínima en su región activa o lineal de 30 y un voltaje colector-emisor en saturación de 0.25 V mientras que el voltaje base-emisor en saturación es de 0.85 V
U1	Opto-Triac MOC3021	Soporta una corriente en el led de entrada de hasta 60 mA mientras que en su salida puede soportar hasta 400 V y 1 A de corriente. El voltaje del led en su entrada consume 1.5 V mientras que el voltaje a la salida del optotriac cuando éste está activado es de 3 V. Requiere por lo menos de 15 mA en su entrada para garantizar el encendido del optotriac.
U2	Triac BT137	Soporta hasta un valor rms de corriente de 8 A entre sus terminales MT2 y MT1, mientras que en su terminal Gate soporta hasta 2 A. Para poder encenderlo en los cuadrantes I y III requiere una corriente en su compuerta de al menos 50 mA y una caída de tensión entre sus terminales Gate y MT1 de 0.7 V. La caída de voltaje entre los terminales MT1 y MT2 cuando el triac está encendido es de 1.3 V. La temperatura de operación del dispositivo no debe superar los 125 °C. Posee una resistencia térmica entre la unión y el ambiente de 60°C/W y una resistencia térmica entre la unión y la envoltura del componente de 2 °C/W. De forma gráfica, se determinó según su hoja de datos que para una corriente efectiva de 7 A corresponde a una disipación de potencia máxima de 10 W.

Fuente: Hoja de Datos de 2N3904, MOC3021 y BT137.

Se procede a verificar si los triac necesitan de un disipador de calor, debido al alto consumo de corriente de las resistencias calefactoras. Para ello se calcula la potencia disipada por el triac y se comprueba que sea menor a la máxima potencia que puede soportar.

$$P_T = 6.82 A * 1.3 V = \mathbf{8.9 W} < \mathbf{10 W} \dots (\mathbf{OK})$$

Seguidamente, se procede a calcular la potencia máxima que puede ser disipada sin un disipador de calor por el triac, teniendo en cuenta que la unión del componente no debe sobrepasar los 125°C y considerando que la temperatura ambiente es de 25 °C, la potencia máxima es de  $P = \frac{125\text{ }^{\circ}\text{C} - 25\text{ }^{\circ}\text{C}}{60\text{ }^{\circ}\frac{\text{C}}{\text{W}}} = 1.67 W$ . Al ser mucho menor la potencia que puede disipar el triac sin disipador de calor, es necesario el uso de uno, para lo cual se le incorporó un disipador de calor de adquisición en el mercado local y se mejoró mediante el uso de ventiladores.

Posteriormente, se procede al cálculo de la resistencia R1, de manera que, se garanticen la corriente necesaria en la entrada del optotriac para llevarlo a la saturación, tomando en cuenta que todas las fuentes de voltaje utilizadas son de 5 V. Dado que según la hoja de datos del MOC3021, se necesitan 15 mA en su entrada para encenderlo, se toma como criterio de diseño que se hará circular 20 mA en la entrada del optotriac para garantizar su encendido.

$$R1 = \frac{5 V - 1.5 V - 0.25 V}{20 mA} = 163 \Omega \approx \mathbf{150 \Omega} (\mathbf{Valor Comercial})$$

Con el valor comercial de la resistencia R1, se obtiene una corriente en la entrada del optotriac de 22 mA, lo cual corresponde a una disipación de potencia en la resistencia R1 de:

$$P_{R1} = (22 mA)^2 * 150 \Omega = 70 mW \approx \frac{1}{4} \mathbf{Watt} (\mathbf{Valor Comercial})$$

Para garantizar la saturación correcta del transistor se trabaja con la ganancia Hfe más pequeña, en este caso Hfe de 30. Con ello se procede a calcular el valor de la resistencia R2 de manera que se cumpla con el criterio de diseño, que la corriente suministrada por cada pin del

microcontrolador sea de 1 mA o menor y teniendo en cuenta que las salidas digitales del microcontrolador corresponden a 5 V o 0 V para representar un nivel lógico alto o bajo.

$$I_{atmega328p} = \frac{22 \text{ mA}}{30} = 0.73 \text{ mA} < 1 \text{ mA} \dots (OK)$$

Con ello, el valor de la resistencia R2 necesaria para garantizar una corriente menor o igual a 0.73 mA es:

$$R_2 = \frac{(5 \text{ V} - 0.85 \text{ V})}{\frac{22 \text{ mA}}{30}} = 5660 \Omega \approx \mathbf{5.6 \text{ K}\Omega} \text{ (Valor Comercial)}$$

$$P_{R_2} = (0.73 \text{ mA})^2 * 5600 \Omega = 3 \text{ mW} \approx \frac{1}{4} \text{ Watt} \text{ (Valor Comercial)}$$

Para el cálculo de la resistencia R4, al ser una resistencia pull-down solo con propósito de protección ante un encendido no intencionado del triac, no debe extraer mucha corriente del terminal de Gate del triac, por lo tanto, se toma el criterio de diseño que debe dejar pasar a lo mucho 0.1 mA de corriente. Además, al estar en paralelo entre en terminal Gate y el terminal MT1 del triac, su caída de tensión será la misma entre estos terminales, la cual es de 0.7 V.

$$R_4 = \frac{0.7 \text{ V}}{0.1 \text{ mA}} = 7000 \Omega \approx \mathbf{8.2 \text{ K}\Omega} \text{ (Valor Comercial)}$$

Finalmente, el valor de la resistencia R3 determina tanto el ángulo de disparo más pequeño posible, como también limita el nivel de corriente sobre el optotriac MOC3021 donde un valor grande de R3 hace que el ángulo de disparo mínimo del triac BT137 sea muy grande, hasta que, de no encenderse en el pico de la onda senoidal, nunca encenderá el triac; de manera opuesta, si el valor de R3 es muy pequeño la corriente a través de optotriac y del terminal Gate del triac será muy alta, dañando ambos componentes. Por lo tanto, se debe mantener un equilibrio entre un valor de R3 lo suficientemente alto para regular la corriente a niveles permisibles, y lo suficientemente bajo para que el ángulo de disparo mínimo del triac sea pequeño y así poder controlar la mayor parte de la señal senoidal de voltaje.

Dado que, la máxima corriente que puede soportar el MOC3021 es de 1 A y la máxima corriente que soporta la compuerta del BT137 es 2 A, se toma el valor de R3 de manera que la corriente a través de ella, no sobrepase 1 A. Tomando en cuenta la resistencia de la carga, ya que ayuda a regular la corriente, además que la mayor corriente ocurrirá cuando se trate de activar el triac en el pico de la onda senoidal, y que cuando el triac está inicialmente apagado, toda la corriente circulará por la compuerta del triac, tenemos:

$$R3 = \frac{220 * \sqrt{2} V - 3 V - 0.7 V - 1 A * 33 \Omega}{1 A} = 275 \Omega \approx \mathbf{330 \Omega (Valor Comercial)}$$

Ahora, comprobamos si el ángulo de disparo mínimo del triac correspondiente al valor de R3 calculado, es lo suficientemente pequeño como para tener control de la mayor parte de la onda senoidal. El ángulo de disparo mínimo se calcula teniendo en cuenta que para garantizar que el triac se active, debe haber 50 mA de corriente en su compuerta, y dado que por la resistencia R3 circula la suma de corrientes tanto de la compuerta del triac como de la resistencia R4, tenemos que el voltaje mínimo que debe alcanzar la onda senoidal para que se pueda activar el triac es  $V(\text{mínimo}) = (50 \text{ mA} + 0.1 \text{ mA}) * [330 \Omega + 33 \Omega] + 3 V + 0.7 V = 22 V$ .

De manera que cuando el valor del voltaje de la onda senoidal de la red, sea menor a 22 V, no se podrá activar el triac, y tomando en cuenta que el voltaje pico es 311 V, un voltaje de 22 V corresponde a un ángulo de 4° sexagesimales lo cual es lo suficientemente pequeño y aceptable y, por lo tanto, el valor de R3 calculado es válido. La potencia disipada de la resistencia R3 y R4 se puede aproximar considerando que circula 50.1 mA de corriente por ella, que es la corriente necesaria para activar el triac.

$$P_{R3 \text{ y } R4} = (50.1 \text{ mA})^2 * 330 \Omega = 0.83 W \approx \mathbf{1 Watt (Valor Comercial)}$$

### 2.1.2 Circuito de Control de la Bomba Hidráulica

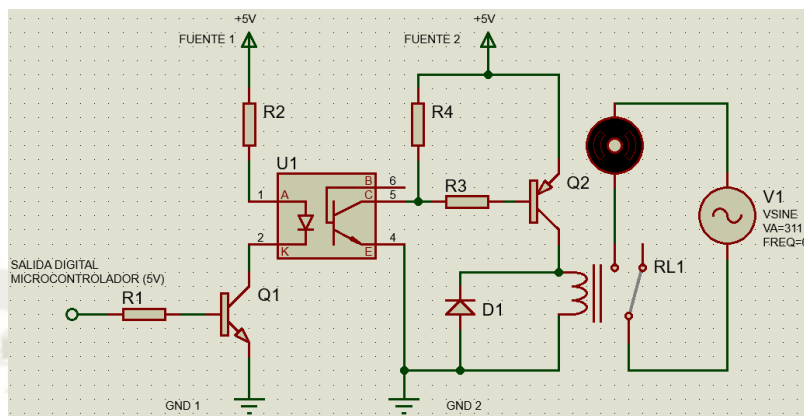
El presente circuito se encargará de poder manipular el encendido y el apagado de la bomba por medio del microcontrolador, el cual brinda salidas digitales de 0 V o 5 V, y al trabajar la bomba

hidráulica seleccionada con un voltaje en alterna, es necesario aislar ambas etapas del circuito.

Dicho esto, el esquema del circuito con el que se trabajará es el siguiente.

**Figura 22**

*Esquema Circuito de Control de Bomba Hidraulica*



Fuente: Elaboración Propia.

Se seleccionaron los siguientes componentes a utilizar en el presente circuito.

**Tabla 11**

*Componentes del Circuito de Control de la Bomba y sus Características*

Símbolo	Componente	Características
Q1	Transistor tipo NPN 2N3904	Soporta hasta una corriente de 100 mA en el colector, y un voltaje colector-emisor máximo de 40 V. Posee una ganancia (Hfe) mínima en su región activa o lineal de 30 y un voltaje colector-emisor en saturación de 0.25 V mientras que el voltaje base-emisor en saturación es de 0.85 V
U1	Optoacoplador 4N35	El led de entrada soporta hasta 60 mA de corriente con una caída de tensión de 1.5 V. El transistor de salida soporta hasta 150 mA de corriente en su colector y soporta hasta 45 V entre el colector y el emisor, además de tener un voltaje colector-emisor de saturación de 0.1 V. El CTR entre la entrada y la salida del optoacoplador es de 50 % cuando la corriente en el led de entrada es de 1 mA, y cuando la corriente de entrada es de 10 mA su CTR es del 100 %.
Q2	Transistor tipo PNP BC327	Soporta una corriente en su colector de hasta 800 mA, con un voltaje emisor-colector máximo de 45 V. Posee un voltaje colector-emisor en saturación de -0.7 V, con un voltaje base-emisor de -1.2 V, además de tener una ganancia (Hfe) mínima en su zona activa de 60, sin embargo, para garantizar la saturación se tomará que su ganancia mínima es de 30 al igual que en el caso de los demás transistores.
D1	Diodo 1N4007	Soporta un máximo de 1 A de corriente media y puede soportar un voltaje efectivo en polarización inversa de hasta 700 V. En su polarización directa consume un voltaje de máximo de 1.1 V.
RL1	Relé JQC-3F(T73) 1C DC5V	El voltaje nominal de su bobina es de 5 VDC con un consumo de corriente de 90 mA para garantizar la conmutación de los contactos del relé. En sus contactos de potencia puede soportar hasta 10 A de corriente efectiva y un voltaje efectivo de 250 V AC.

Fuente: Hoja de Datos del 2N3904, 4N35, BC137, 1N4007 y JQC-3F 1C DC5V

Para calcular la resistencia R1, tomamos en cuenta que el criterio adoptado de que el microcontrolador debe aportar como máximo 1 mA de corriente, considerando además las características del transistor 2N3904 (Q1) y que una salida digital alta del microcontrolador equivale a 5 V, tenemos que:

$$R1 = \frac{5 V - 0.85 V}{1 mA} = 4150 \Omega \approx \mathbf{4.7 K\Omega (Valor Comercial)}$$

Recalculando la corriente suministrada por el microcontrolador con el valor comercial de la resistencia R1, tenemos que suministrará 0.88 mA de corriente, con ello la potencia disipada por la resistencia R1 es de:

$$P_{R1} = (0.88 mA)^2 * 4700 \Omega = 3.67 mW \approx \frac{1}{4} \mathbf{Watt (Valor Comercial)}$$

Tomando como criterio que la ganancia (Hfe) mínima en la zona lineal de todos los transistores utilizados es de 30 (para garantizar su saturación), y considerando que todas las fuentes externas son de 5V, calculamos el valor de la resistencia R2.

$$R2 = \frac{5 V - 1.5 V - 0.25 V}{30 * 0.88 mA} = 123 \Omega \approx \mathbf{150 \Omega (Valor Comercial)}$$

Recalculando la corriente que circula a la entrada del optoacoplador 4N35 (U1) con el valor comercial de la resistencia R2, resulta ser de 22 mA, con ello la potencia de la resistencia R2 es de:

$$P_{R2} = (22 mA)^2 * 150 \Omega = 70 mW \approx \frac{1}{4} \mathbf{Watt (Valor Comercial)}$$

Para el cálculo de la resistencia R3 se toma el mismo criterio de ganancia mínima Hfe de 30 para el transistor Q2, y tomando en cuenta que el relé utilizado requiere 90 mA de corriente para encenderse y que todas las fuentes utilizadas son de 5 V, asumiendo que el transistor del optoacoplador está saturado y por ende la base del transistor Q2 está conectada a tierra, para que el transistor Q2 permita el paso de corriente de 90 mA, la resistencia R3 debe ser:

$$R_3 = \frac{5V - 1.2V - 0.1V}{\frac{90mA}{30}} = 1233 \Omega \approx 1.2 K\Omega \text{ (Valor Comercial)}$$

$$P_{R_3} = \left(\frac{90mA}{30}\right)^2 * 1200 \Omega = 11 mW \approx \frac{1}{4} \text{ Watts (Valor Comercial)}$$

Finalmente, para el cálculo de la resistencia R4 se tiene que el CTR del optoacoplador 4N35, cuando la corriente en su led de entrada es de 22 mA es del 100 %. Dado que por la salida del optoacoplador 4N35 (U1) circulará la suma de las corrientes de R3 y R4, tenemos que el valor de R4 es de:

$$\frac{90mA}{30} + \frac{5V - 0.1V}{R_4} = 22mA * 1 \rightarrow R_4 = 258 \Omega \approx 270 \Omega \text{ (Valor Comercial)}$$

La corriente a través de R4 recalculada al utilizar el valor comercial, es de 18 mA, lo cual corresponde a una disipación de potencia a través de R4 de:

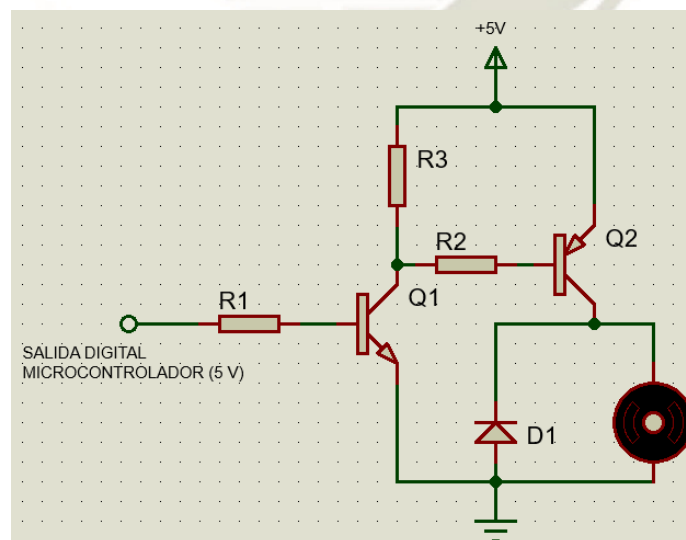
$$P_{R_4} = (18mA)^2 * 270 \Omega = 89 mW \approx \frac{1}{4} \text{ Watt (Valor Comercial)}$$

### 2.1.3 Circuito de Encendido de Ventiladores de Refrigeración

El circuito de control de ventiladores es similar al circuito de control de la bomba.

**Figura 23**

*Esquema Circuito de Control de Ventiladores*



Fuente: Elaboración Propia.

Los componentes seleccionados para implementar el circuito son los siguientes:

**Tabla 12**

*Componentes del Circuito de Control de Ventiladores*

Símbolo	Componente	Características
-	Ventilador	Se trabajó con ventiladores de 5 V en continua y con un consumo de corriente de 0.2 A.
Q1	Transistor BJT tipo NPN 2N3904	Soporta hasta una corriente de 100 mA en el colector, y un voltaje colector-emisor máximo de 40 V. Posee una ganancia (Hfe) mínima en su región activa o lineal de 30 y un voltaje colector-emisor en saturación de 0.25 V mientras que el voltaje base-emisor en saturación es de 0.85 V
Q2	Transistor BJT tipo PNP BC327	Soporta una corriente en su colector de hasta 800 mA, con un voltaje emisor-colector máximo de 45 V. Posee un voltaje colector-emisor en saturación de -0.7 V, con un voltaje base-emisor de -1.2 V, además de tener una ganancia (Hfe) mínima en su zona activa de 60, sin embargo, para garantizar la saturación se tomará que su ganancia mínima es de 30 al igual que en el caso de los demás transistores.
D1	Diodo 1N4007	Soporta un máximo de 1 A de corriente media y puede soportar un voltaje efectivo en polarización inversa de hasta 700 V. En su polarización directa consume un voltaje de máximo de 1.1 V.

*Fuente:* Hoja de Datos del 2N3904, BC327 y 1N4007.

Para el cálculo de la resistencia R1, se toma en cuenta que la corriente máxima entregada por el microcontrolador es de 1 mA, por lo tanto, el valor de R1 se calcula como:

$$R1 = \frac{5\text{ V} - 0.85\text{ V}}{1\text{ mA}} = 4150\ \Omega \approx \mathbf{4.7\text{ K}\Omega\text{ (Valor Comercial)}}$$

El valor de la corriente suministrada por el microcontrolador, recalculada con el valor comercial de la resistencia R1 es de 0.88 mA, así la potencia disipada por la resistencia R1 es de:

$$P_{R1} = (0.88\text{ mA})^2 * 4700\ \Omega = 3.67\text{ mW} \approx \frac{1}{4}\text{ Watt (Valor Comercial)}$$

Para el cálculo de la resistencia R2 se toma como criterio que la ganancia mínima (Hfe) en la zona activa de todos los transistores es de 30, ello con el fin de garantizar la saturación de los transistores ya que mientras más bajo se considere el Hfe es mejor.

$$R2 = \frac{5\text{ V} - 1.2\text{ V} - 0.25\text{ V}}{\frac{0.2\text{ A}}{30}} = 533\ \Omega \approx \mathbf{560\ \Omega\text{ (Valor Comercial)}}$$

$$P_{R2} = \left(\frac{0.2\text{ A}}{30}\right)^2 * 560\ \Omega = 25\text{ mW} \approx \frac{1}{4}\text{ Watt (Valor Comercial)}$$

El valor de la resistencia pull-up R3 se da con base en que a través del colector del transistor Q1, circula la suma de las corrientes a través de R2 y R3, por lo tanto, considerando una ganancia

mínima en su zona lineal de todos los transistores de 30, tenemos que el valor de la resistencia R3 es:

$$\frac{0.2 A}{30} + \frac{5 V - 0.25 V}{R3} = 0.88 mA * 30 \rightarrow R3 = 241 \Omega \approx 270 \Omega \text{ (Valor Comercial)}$$

Con ello, la corriente recalculada a través de la resistencia R3 es de 17.6 mA, por lo tanto, potencia disipada por la resistencia R3 es de:

$$P_{R3} = (17.6 mA)^2 * 270 \Omega = 83.6 mW \approx \frac{1}{4} \text{ Watt (Valor Comercial)}$$

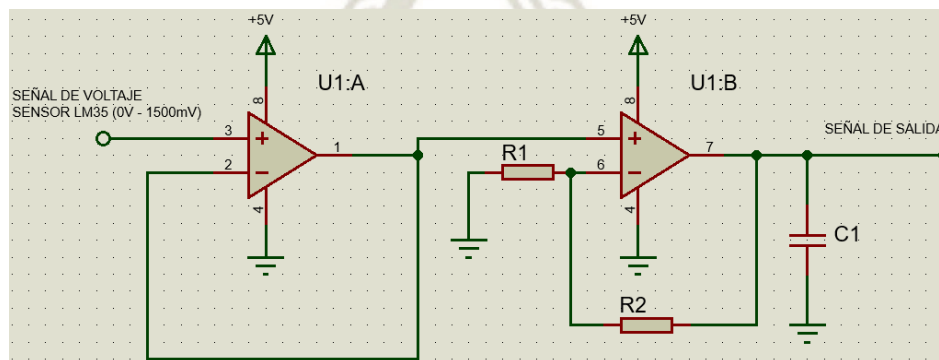
### 2.1.4 Circuito de Acondicionamiento de Señal del Sensor LM35

El presente circuito tiene como finalidad ajustar los niveles de voltaje que proporciona el sensor de temperatura LM35 a los niveles de voltaje permisibles por el Atmega328p, de manera que se aproveche el mayor rango posible de resolución del microcontrolador.

Dado que, como una de sus características del sensor LM35 es que ya es un sensor lineal, que genera 10 mV en su salida por cada grado centígrado, solamente es necesario amplificar la señal de salida del sensor, de manera que se pueda aprovechar el mayor rango posible permitido por el ADC del microcontrolador. Siguiendo este contexto, el esquema del circuito escogido para llevar a cabo dicha tarea de amplificación es el siguiente:

**Figura 24**

*Esquema del Circuito de Acondicionamiento del Sensor LM35*



Fuente: Elaboración Propia.

Los componentes seleccionados para implementar este circuito son los siguientes.

**Tabla 13**

*Componentes y Características del Circuito de Acondicionamiento de Señal*

<b>Símbolo</b>	<b>Componente</b>	<b>Características</b>
U1:A/ U1:B	Amplificador Operacional de propósitos generales LM358	Puede ser alimentado con una diferencia de potencial entre su alimentación positiva y negativa de 32 V, sin embargo, requiere como mínimo una diferencia de voltaje en su alimentación de 3 V. El rango de entrada de voltaje común depende del voltaje de alimentación y va desde +Vcc-1.5 V como máximo, hasta los -Vee como mínimo. El rango de voltajes en la salida del opamp va desde +Vcc-1.5 V como máximo hasta -Vee+5 mV como mínimo. Cuando el opamp está alimentado con Vcc= 5V, la máxima corriente que puede proveer es de 60 mA, y sabiendo que la salida máxima del opamp es de 5 V-1.5 V = 3.5 V, un aproximado de su impedancia de salida es de 60Ω.

*Fuente:* Hoja de Datos del LM358.

Dado que en operación normal de los opamp (con retroalimentación negativa, amplificadores) se puede considerar que el voltaje en su terminal inversor y no inversor son iguales (tierra virtual), entonces el voltaje en modo común será el voltaje, que es el voltaje promedio entre ambos terminales, será aproximadamente igual al voltaje en cualquiera de estos terminales. Por ende, dado que la salida del sensor opera entre los 20 mV y los 1500 mV (2°C hasta 150 °C) no se viola el límite de voltaje en la entrada. Bajo este contexto, teniendo en cuenta que la salida máxima de los opamp es de 3.5 V cuando se alimenta con 5V, se toma el criterio de diseño de acondicionar la señal de manera que 0 °C representen 0 mV y 70 °C representen 3500 mV, ya que se asume que los sensores no medirán temperaturas mayores a 70°C. Con ello, la ecuación de la recta que relaciona la señal de entrada al circuito de acondicionamiento con su señal de salida está dada por

$$V_{SALIDA} (mV) = 5 * V_{ENTRADA} (mV) .$$

Al tener en cuenta que el emisor seguidor tiene una salida de voltaje igual a su entrada, y que el opamp no inversor tiene una amplificación de  $1 + R2/R1$ , tenemos que  $1 + \frac{R2}{R1} = 5 \rightarrow \frac{R2}{R1} = \frac{4}{1}$ .

Escogiendo valores comerciales de resistencias que más se asemejen a la relación dada entre R2 y R1, y que, además, su valor sea lo suficientemente alto como para que circule una

cantidad de corriente pequeña a través de ellas, escogemos los siguientes valores de resistencias de  $\frac{1}{4}$  de Watt de potencia  $R1 = 12 K\Omega$  y  $R2 = 47 K\Omega$ .

Con ello, la nueva relación entre la señal de entrada al circuito de acondicionamiento, y su salida está regida por la siguiente ecuación  $V_{SALIDA} (mV) = \left(\frac{47}{12} + 1\right) * V_{ENTRADA} (mV)$ . La cual corresponde a una recta que para un voltaje de entrada de 0 mV tiene una salida de 0 mV y para un voltaje de entrada de 712 mV ( $\approx 71^\circ C$ ) corresponde a un voltaje de salida de 3500 mV.

Para calcular un valor aproximado del capacitor de manera que éste funcione como un filtro pasa bajos pasivo, se tiene en cuenta que, de manera aproximada, como se estipula en la Tabla 13, la impedancia de salida del opamp es de  $60 \Omega$  ( $R3$ ), y además según la hoja de datos del Atmega328p, la impedancia de entrada de su ADC es de un valor máximo de  $100 M\Omega$  ( $R4$ ).

Seguidamente procedemos a hallar la respuesta en frecuencia de dicho modelo, para lo cual se halla la transformada de Fourier de la ecuación diferencial del modelo, lo cual se puede llevar a cabo hallando la transformada de Laplace de la función de transferencia de la ecuación diferencial y hacer el cambio de variable de “s” por “j\*w” donde “w” es la frecuencia angular.

Con ello, la transformada de Fourier del modelo del filtro pasa-bajos es:

$$F(w) = \frac{1}{\left(1 + \frac{R3}{R4}\right) + R3 * C1 * jw} \rightarrow \text{Como } R4 \gg R3 \rightarrow F(w) \approx \frac{1}{1 + R3 * C1 * jw}$$

Considerando solo la amplitud de la respuesta de frecuencia, tenemos que el módulo de la expresión  $F(w)$ , que es un número imaginario, y expresando la ganancia en decibelios tenemos:

$$|F(w)| = -20 * \log\left(\sqrt{1^2 + [R3 * C1 * w]^2}\right) db$$

Donde la frecuencia de corte será a partir de  $\frac{1}{R3 * C1}$ . Bajo este contexto, y al tener en cuenta que el ruido eléctrico posee frecuencias altas, se escoge arbitrariamente una frecuencia de corte baja de 60 Hz, en donde cualquier señal por encima de los 60 Hz será atenuada.

$$w = \frac{1}{R3 * C1} \rightarrow 2 * \pi * 60 \frac{rad}{s} = \frac{1}{60 \Omega * C1} \rightarrow C1 = 44.2 \mu F \approx 47 \mu F (16V, Valor Comercial)$$

## 2.2 Diseño del Controlador Digital PID en su Forma Modificada PI-D

### 2.2.1 Identificación de la Función de Transferencia de la Planta

En este caso, la planta a controlar es la temperatura del tanque de agua del módulo, y al tratarse de un proceso continuo, la función de transferencia de la planta será continua. Dado que la señal de salida del controlador a diseñar, será la señal de entrada hacia la planta, se procede primero a definir el rango de operación de la señal de salida del controlador que se diseñará, seleccionando arbitrariamente un rango limitado entre 0 y 100, representando una señal de control nula y una señal de control máxima respectivamente. Bajo el mismo contexto, se procede a identificar la señal de salida de la planta a controlar, la cual, al ser la temperatura del agua, para cumplir con la condición inicial nula requerido para la definición de la función de transferencia, se toma como señal de salida de la planta el incremento de temperatura o la variable de desviación con respecto a la temperatura del agua en estado estacionario (cuando la señal de entrada a la planta es nula). Aclarado ello, se procedió a encender las resistencias calefactoras sumergibles que calientan el agua a su máxima potencia y se registró la temperatura medida por el sistema de medición diseñado en la presente tesis (precisión de  $0.1^{\circ}\text{C}$ ), y por los termostatos XMTG-2301-J (precisión de  $1^{\circ}\text{C}$ ). A continuación, se muestra el registro del tiempo (medido con un cronómetro manual) en que ocurrió una variación de la temperatura medida por el XMTG-2301-J y la temperatura medida por el sistema diseñado, en el mismo instante de tiempo.

**Tabla 14**

*Incremento de Temperatura del Agua ante una Señal de Control Máxima*

Tiempo del Cambio	Temp. XMTG-2301-J	Temp. LM35	Tiempo del Cambio	Temp. XMTG-2301-J	Temp. LM35	Tiempo del Cambio	Temp. XMTG-2301-J	Temp. LM35
0 s	17 °C	18.9 °C	560 s	32 °C	35.9 °C	980 s	47 °C	50.7 °C
80 s	18 °C	19.7 °C	585 s	33 °C	36.8 °C	1010 s	48 °C	51.7 °C
140 s	19 °C	21.0 °C	610 s	34 °C	37.8 °C	1040 s	49 °C	52.9 °C
180 s	20 °C	22.5 °C	640 s	35 °C	38.9 °C	1070 s	50 °C	53.8 °C

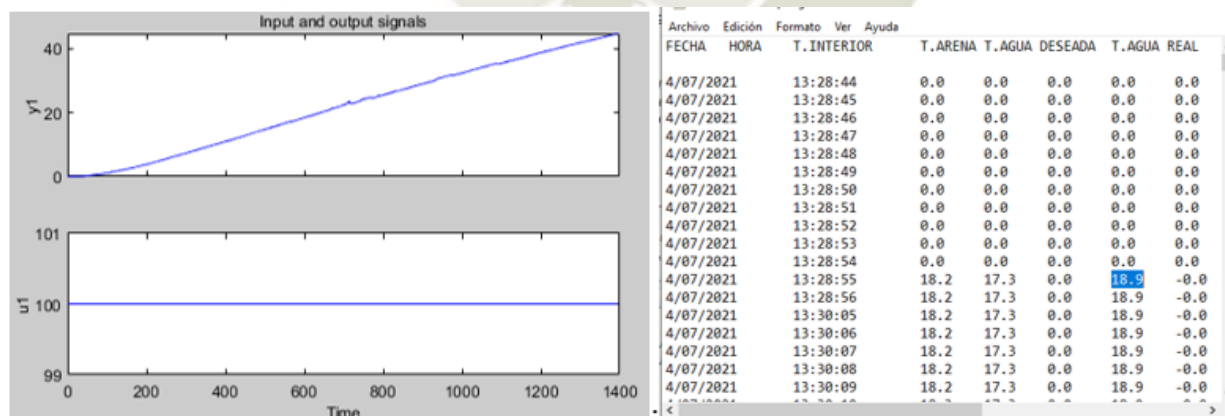
220 s	21 °C	23.5 °C	665 s	36 °C	39.9 °C	1100 s	51 °C	54.5 °C
255 s	22 °C	24.8 °C	695 s	37 °C	41.2 °C	1135 s	52 °C	55.5 °C
290 s	23 °C	26.0 °C	730 s	38 °C	42.1 °C	1170 s	53 °C	56.7 °C
320 s	24 °C	27.0 °C	750 s	39 °C	43.2 °C	1200 s	54 °C	57.6 °C
355 s	25 °C	28.2 °C	780 s	40 °C	43.6 °C	1230 s	55 °C	58.6 °C
380 s	26 °C	29.2 °C	810 s	41 °C	44.5 °C	1260 s	56 °C	59.7 °C
410 s	27 °C	30.3 °C	840 s	42 °C	45.8 °C	1295 s	57 °C	60.7 °C
440 s	28 °C	31.4 °C	865 s	43 °C	46.7 °C	1330 s	58 °C	61.7 °C
470 s	29 °C	32.5 °C	895 s	44 °C	47.7 °C	1360	59 °C	62.6 °C
500 s	30 °C	33.5 °C	925 s	45 °C	48.9 °C	1395 s	60 °C	63.7 °C
525 s	31 °C	34.6 °C	950 s	46 °C	50.0 °C	-	-	-

Fuente: Elaboración Propia.

Cabe resaltar que la temperatura del agua seguía incrementando sin alcanzar el estado estacionario, es por ello que los datos se truncaron hasta una temperatura de 60 °C. Dado que los datos registrados en la Tabla 14 se tomaron de manera manual, están sujetos a imprecisiones, por lo que la medición de datos leídos por el Atmega328p se registró automáticamente en un documento de texto con un periodo de muestreo de 1 segundo, mediante Labview. Tomando el incremento de temperatura del estado inicial (18.9 °C), se observa que la respuesta de la planta a controlar se asemeja a un integrador.

### Figura 25

Respresentación Grafica de la Respuesta de la Planta

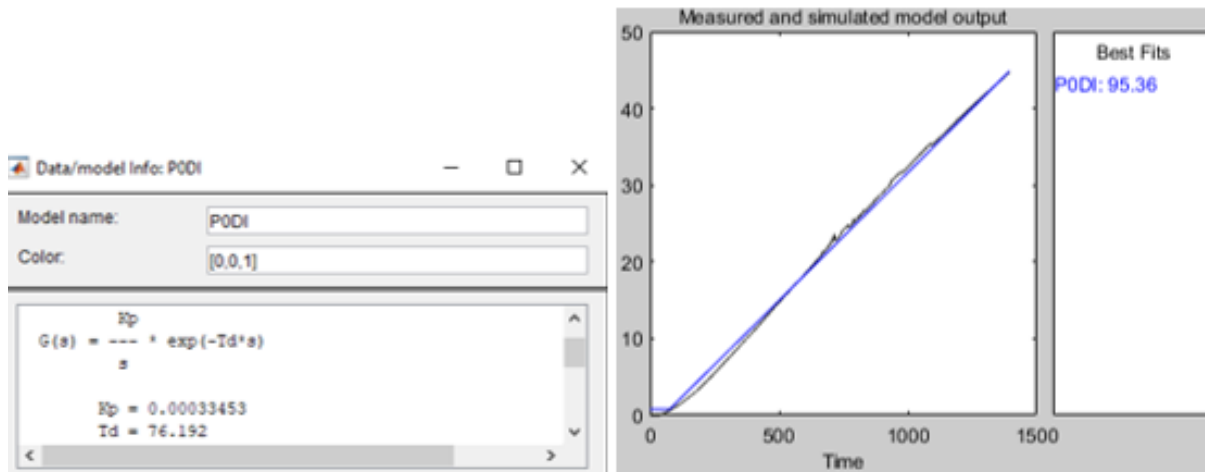


Fuente: Elaboración Propia.

Seguidamente, utilizando la herramienta Ident de Matlab, se obtuvo un aproximado de la función de transferencia de la planta con un 95.36 % de exactitud  $G_p(s) = \frac{0.00033453 \cdot e^{-76.192 \cdot s}}{s}$ . La función de transferencia corresponde a un integrador con un tiempo muerto de reacción de 76.2 s.

**Figura 26**

*Obtención de la Función de Transferencia de la Planta*



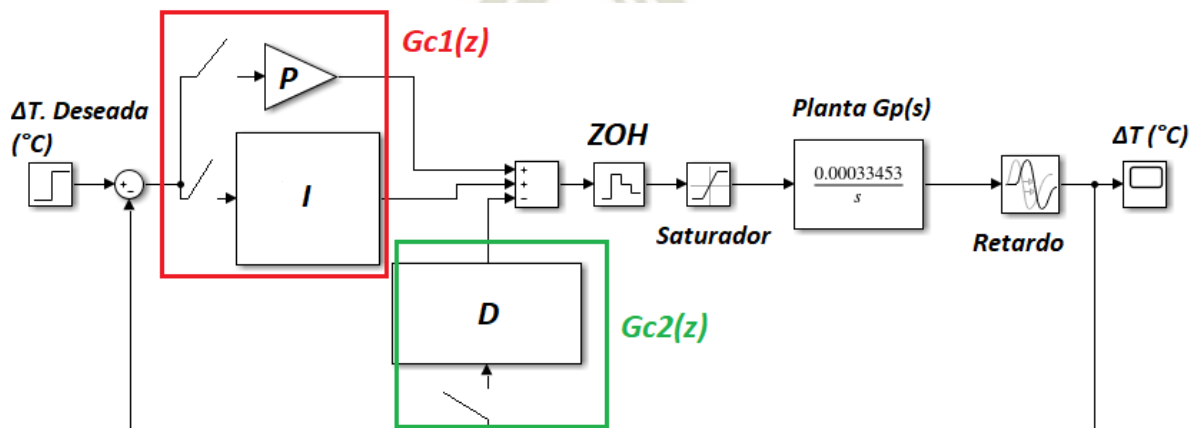
Fuente: Elaboración Propia.

### 2.2.2 Diseño del Control Digital PI-D

La forma modificada PI-D del controlador, consiste en operar la parte derivativa del controlador solamente con la señal de salida del sistema, mientras que la parte proporcional e integradora operan con la señal de error entre la referencia y la señal de salida del sistema, y al ser un controlador digital, es necesario la operación de muestreo en la entrada de cada bloque digital y un retenedor de orden cero a la salida de cada bloque digital.

**Figura 27**

*Diagrama de Bloques del Sistema de Control Digital*



Fuente: Elaboración Propia.

Donde la suma de  $G_{C1}(z)$  (parte proporcional + integral) y  $G_{C2}(z)$  (parte derivativa) es el controlador PID digital. De dicho diagrama de bloques, se procede a obtener la función de transferencia pulso (digital) del sistema completo.

$$\frac{Salida_{Discreta}}{Referencia_{Discreta}} = \frac{C(z)}{R(z)} = \frac{G_{C1}(z) * Z\{ZOH(s) * G_P(s)\}}{1 + [G_{C1}(z) + G_{C2}(z)] * Z\{ZOH(s) * G_P(s)\}}$$

De la función de transferencia del sistema, se puede observar que la ecuación característica del sistema es la misma que si se tratara de un control PID en su forma común y por lo tanto el procedimiento de diseño es el mismo que si se tratase de dicho caso.

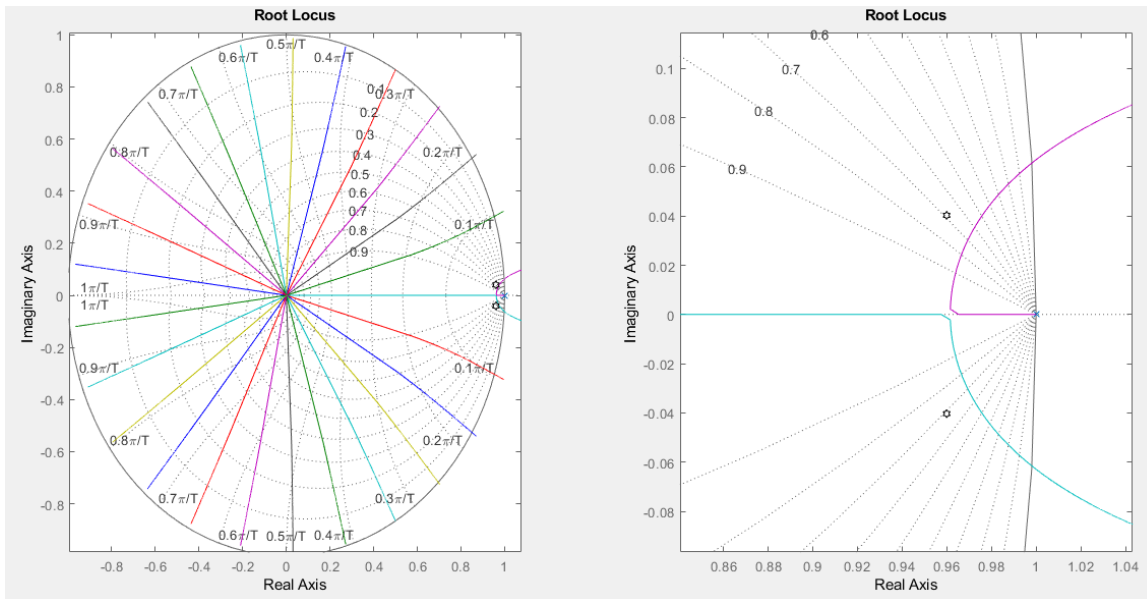
Seguidamente se procede a definir un periodo de muestreo adecuado y las características transitorias que se desea tenga el sistema. Para ello se utilizará la técnica gráfica de diseño del lugar de las raíces. Al ser un sistema discreto, para graficar el lugar de las raíces en el plano Z y según dicha gráfica, seleccionar los polos dominantes deseados, se procede a seleccionar un periodo de muestreo ( $T_s$ ) adecuado, tomando una frecuencia de muestreo ( $w_s$ ) mínima tal que sea de 10 a 20 veces la frecuencia máxima del sistema (Ogata, 1996), y al observar que la planta posee un retardo redondeado de 75 segundos en responder, se toma que la frecuencia máxima de la respuesta del sistema es de  $W_1 = 2 * \pi * \frac{1}{75} \text{ rad/s}$ . Con ello, el periodo de muestreo mínimo requerido para que el sistema digital sea estable y predecible al diseño es de  $W_s \geq 20W_1 \rightarrow T_s \leq \frac{\pi}{10 * \frac{2 * \pi}{75}} \rightarrow T_s \leq 3.75 \text{ seg}$ . Una vez se cuenta con el periodo de muestreo mínimo requerido, se procede a seleccionar un periodo de muestreo más redondo de  **$T_s = 3 \text{ segundos}$** .

Aclarado ello, procede a graficar el lugar de las raíces del sistema digital sin controlar, en donde de dicha gráfica, se observa que se puede mejorar la respuesta del sistema para que éste pueda tener un tiempo de establecimiento aproximado de 300 segundos, con un máximo sobreimpulso aproximado de 5 %, lo cual corresponde a la posición de los polos deseados en

tiempo continuo de  $s_{1,2} = -0.01333 \pm j * 0.01398$ , que corresponde a una posición en el plano Z de  $z_{1,2} = e^{s_{1,2} * T_s} = |0.9607894401| \angle \pm 0.04195996331 \text{ rad} = 0.9599437627 \pm j * 0.04030286076$ .

**Figura 28**

*Lugar de las Raíces del Sistema en el Plano Z y Polos Dominantes Deseados*



Fuente: Elaboración Propia.

Dado que la función de transferencia en lazo abierto del sistema discreto sin controlar está

dada por  $Z\{ZOH(z) * G_p(s)\} = \frac{0.001004}{z^{25} * (z-1)}$ , y teniendo en cuenta que la función de transferencia del

controlador digital PID está dada por el producto de un controlador PD con un controlador PI

( $PID(z) = PD(z) * PI(z) = K * \frac{z-a}{z} * \frac{z-b}{z-1}$ ), tenemos que la función de transferencia en lazo

abierto del sistema controlado es  $G_{la}(z) = K * \frac{(z-a)*(z-b)*0.001004}{z^{25}*(z-1)^2*z}$ .

Considerando primero solamente la parte PD del controlador digital, éste debe aportar una magnitud y ángulo necesarios a la función de transferencia en lazo abierto para que el lugar de las raíces pase por los polos deseados.

$$K * \frac{z-a}{z} \frac{0.001004}{z^{25} * (z-1)} \Big|_{z_{1,2}} \rightarrow 0.9599437627 \pm j * 0.04030286076 = |0.0499893929| \angle -197.33151^\circ$$

Por lo tanto, el controlador PD debe aportar un ángulo de  $17.33151^\circ$  (para que el ángulo sume  $180^\circ$ ), con lo cual la posición del cero del controlador PD queda en  $0.8307963563$ , y debe aportar una ganancia  $K$  para que la magnitud sea igual a la unidad  $PD(z) = \frac{147.862 * (z - 0.830796356)}{z}$ .

Para la parte PI del controlador, se diseña de manera que no modifique la respuesta transitoria posicionando el cero del controlador lo más cercano al polo del controlador PI, de manera que aporte una magnitud cercana a la unidad y un ángulo cercano a  $0^\circ$ . Escogiendo arbitrariamente por prueba y error, la posición del cero en  $0.9997$  tenemos que:

$$PI(z) = \frac{z - 0.9997}{z - 1} |_{z=1,2} \rightarrow 0.9599437627 \pm j * 0.04030286076 = |0.996285| \angle -0.21535^\circ$$

Con ello, la función de transferencia del controlador PID está dada como:

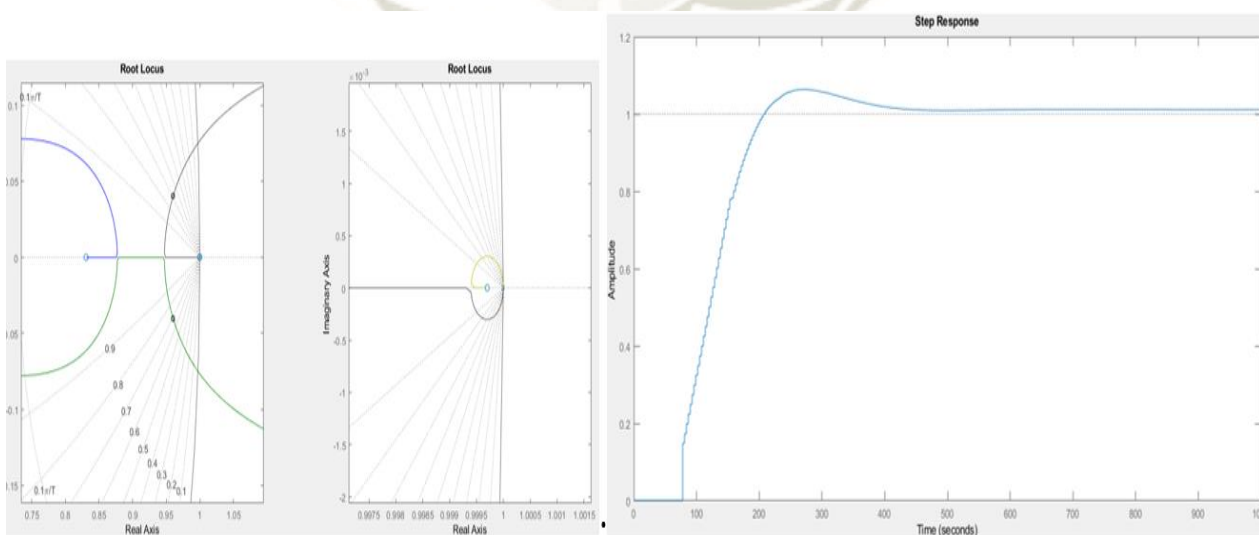
$$PID(z) = \frac{147.862 * (z - 0.8307963563) * (z - 0.9997)}{z * (z - 1)} = \frac{147.862 * z^2 - 270.6608522 * z + 122.8064}{z * (z - 1)}$$

$$PID(z) = Kp + Ki * \frac{z}{z - 1} + Kd * \frac{z - 1}{z} \rightarrow Kp = 25.05 ; Ki = 0.007506 ; Kd = 122.8$$

Cabe aclarar que dichos valores son referenciales, ya que no se tuvo en cuenta no linealidades del sistema, así como características de saturación.

### Figura 29

*Lugar de las Raíces del Sistema Compensado y su Respuesta*



Fuente: Elaboración Propia.

Finalmente, se realiza la interpretación del controlador PID digital, de manera que se obtenga las ecuaciones en diferencia que representen dichos bloques para poderlas implementar en software en Código C. Para ello se toma la transformada Z inversa de cada bloque del controlador, teniendo en cuenta que la entrada del controlador  $G_{C1}(z)$  es el error de la señal (“E”) y la entrada del controlador  $G_{C2}(z)$  es directamente la señal medida a la salida del sistema (“C”) y la salida de ambos controladores es la señal de control que se limitó entre 0% y 100% (“Y”). Por conveniencia, se toma la transformada Z inversa de la expresión  $G_{C1}(z) + G_{C2}(z)$  que es el PID en su forma paralela, donde se debe realizar una actualización del cálculo cada 3 segundos.

$$\mathbf{Proporcional} \rightarrow \frac{Y_P(z)}{E(z)} = K_P \rightarrow Z^{-1}\{Y_P(z)\} = Z^{-1}\{K_P * E(z)\} \rightarrow \mathbf{Y_P[n] = K_P * E[n]}$$

$$\mathbf{Integral} \rightarrow \frac{Y_I(z)}{E(z)} = K_I * \frac{1}{1 - z^{-1}} \rightarrow Y_I(z) = K_I * E(z) + Y_I(z) * z^{-1}$$

$$Z^{-1}\{Y_I(z)\} = Z^{-1}\{K_I * E(z) + Y_I(z) * z^{-1}\} \rightarrow \mathbf{Y_I[n] = K_I * E[n] + Y_I[n - 1]}$$

$$\mathbf{Derivativo} \rightarrow \frac{Y_D(z)}{C(z)} = K_D * \frac{1 - z^{-1}}{1} \rightarrow Y_D(z) = K_D * [C(z) - C(z) * z^{-1}]$$

$$Z^{-1}\{Y_D(z)\} = Z^{-1}\{K_D * [C(z) - C(z) * z^{-1}]\} \rightarrow \mathbf{Y_D[n] = K_D * (C[n] - C[n - 1])}$$

## CAPÍTULO IV: CALIBRACIÓN, PRUEBAS EXPERIMENTALES Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

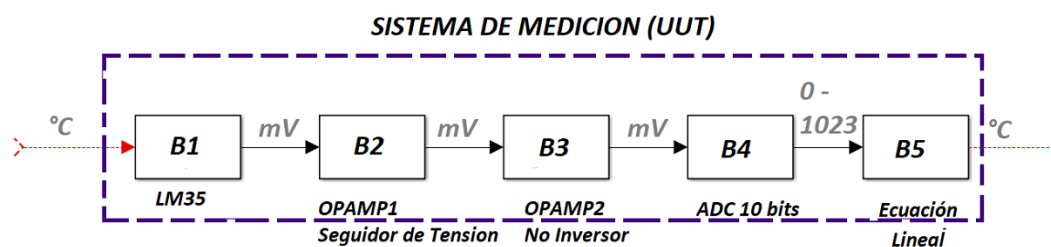
El presente capítulo está destinado a la calibración del sistema de medición de temperatura del sistema electrónico del módulo (usando el sensor LM35), así como también a la presentación de las pruebas experimentales realizadas sobre el módulo para comprobar que su correcto funcionamiento, detallando el procedimiento llevado a cabo para la operación del módulo, presentando a su vez evidencia fotográfica de la implementación del módulo.

### 1. Análisis de Incertidumbre (Calibración) en la Medición de Temperatura del Sistema Electrónico del Módulo

Primero se identifica el componente o instrumento a calibrar, el cual será referido aquí como UUT, y seguidamente se identifica el componente o instrumento de referencia referido aquí como MET que es sobre el cual se compara las mediciones del UUT. El UUT es el sistema de medición de temperatura diseñado en el sistema electrónico del módulo, el cual es el que se quiere calibrar, y cuyos componentes son el sensor de temperatura LM35, el circuito de acondicionamiento, el periférico ADC del microcontrolador Atmega328p y el procesamiento de datos llevado a cabo mediante el software el cual es una ecuación para convertir la salida del ADC en la temperatura en °C. De esta manera, el instrumento a calibrar (UUT) es un sistema de medición que consta de 5 bloques como se muestra en la Figura 30.

**Figura 30**

*Sistema de Medición a Calibrar (UUT)*



Fuente: Elaboración Propia.

De esta manera, se calibrará el sistema completo considerándolo como si fuera un solo bloque o instrumento de medición, el cual está compuesto por cinco bloques. Por otro lado, el MTE, el cual es la referencia sobre la cual se compara el UUT, será el controlador de temperatura industrial XMTG-2301-J, el cual es usado para controlar la temperatura cuando el módulo está siendo operado en el modo manual. En el caso del MTE la medición de la temperatura es directa, con lo que el sistema de medición consta de un solo bloque.

### 1.1 Modelado del Error en la Calibración del UUT

Dado que tanto el UUT como el MTE son utilizados para medir un parámetro común (la temperatura), el resultado nominal de la calibración y su error correspondiente, el cual es una estimación del error de sesgo (o sistemático,  $e_b$ ) del UUT, será la diferencia entre las mediciones realizadas por el UUT ( $x_{UUT}$ ) y del MTE ( $y_{MTE}$ ), denominada aquí como “ $\delta$ ”; (National Aeronautics and Space Association [NASA], 2010). Así, el resultado nominal de la calibración del UUT (medición del error de sesgo del UUT,  $e_{b,UUT}$ ) está dado por  $\delta = x_{UUT} - y_{MTE}$ .

El error de calibración  $\varepsilon_{cal}$  o error en la estimación de  $\delta$  está compuesto por todas las fuentes de error en la medición hecha por el termostato XMTG-2301-J (MTE) ( $e_{m,MTE}$ ) y por las fuentes de error en la medición del UUT sin contar el error sistemático del mismo ( $e_{b,UUT}$ ), ya que dicho error es el resultado de la calibración que se quiere hallar.

$$\varepsilon_{cal} = e_{Otros,UUT} - e_{m,MTE} = e_{Otros,UUT} - (e_{b,MTE} + e_{Otros,MTE})$$

Con ello, se conoce los errores individuales que contribuyen al error de calibración  $\varepsilon_{cal}$ , y por lo tanto, la incertidumbre en el error de calibración también dependerá de la incertidumbre en los errores que componen el error de calibración e infiriendo que no hay correlaciones aparentes entre dichas fuentes de error individuales, la incertidumbre en la calibración es:

$$\mu(\varepsilon_{cal}) = \sqrt{\text{VAR}(e_{Otros,UUT} - e_{m,MTE})} = \sqrt{\mu(e_{m,MTE})^2 + \mu(e_{Otros,UUT})^2}$$

## 1.2 Incertidumbre en el Error de Medición del Termostato XMTG-2301-J (MTE)

El modelo matemático nominal o ideal (sin fuentes de errores) del MTE está dado por  $T_{leida} = T_{Real} \rightarrow T = \text{Temperatura } ^\circ\text{C}$ . Sin embargo, se necesita incluir en dicho modelo las fuentes de error del MTE que contribuyen al error de calibración general.

**Tabla 15**

*Identificación e Incertidumbre de las Fuentes de Error del XMTG-2301-J*

Parámetro	Tipo de Análisis para Calcular su Incertidumbre	Distribución de Probabilidad del Error	Valor Nominal	Límites de Tolerancia	Probabilidad de Ocurrencia	Incertidumbre Estándar
Temperatura ( $T_{Real}$ )	-	-	27 °C	-	-	-
-Precisión ( $e_{b,MTE}$ )	Tipo B (Heurístico)	Normal	0 °C	± 2.5 °C	99%	0.9705 °C
-Resolución ( $e_{Res,MTE}$ )	Tipo B (Heurístico)	Uniforme	0 °C	± 0.5 °C	100%	0.2887 °C
Repetitividad ( $e_{Rep,MTE}$ )	Tipo A (Muestreo de 20 Lecturas de Medición)	Normal	0 °C	-	-	0.1364 °C

Fuente: Hoja de Datos del XMTG-2301-J y Elaboración propia.

Con las fuentes de error del MTE reconocidas se procede a desarrollar el modelo matemático del error de medición del MTE tomando solamente componentes lineales y con dicha ecuación de error en la medición, calcular la incertidumbre en el error de medición del MTE ( $\mu(e_{m_{MTE}})$ ) con sus grados de libertad ( $V_{eff}$ ).

$$T_{leida} \text{ } ^\circ\text{C} = T_{Real} \text{ } ^\circ\text{C} + e_{b,MTE} \text{ } ^\circ\text{C} + e_{Res,MTE} \text{ } ^\circ\text{C} + e_{Rep,MTE} \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$e_{m_{MTE}} \text{ } ^\circ\text{C} = 1 * e_{b,MTE} \text{ } ^\circ\text{C} + 1 * e_{Res,MTE} \text{ } ^\circ\text{C} + 1 * e_{Rep,MTE} \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\mu(e_{m_{MTE}}) = \sqrt{1^2 * \mu(e_{b,MTE})^2 + 1^2 * \mu(e_{Res,MTE})^2 + 1^2 * \mu(e_{Rep,MTE})^2}$$

$$\mu(e_{m_{MTE}}) = \sqrt{1^2 * [0.9705 \text{ } ^\circ\text{C}]^2 + 1^2 * [0.2887 \text{ } ^\circ\text{C}]^2 + 1^2 * [0.1364 \text{ } ^\circ\text{C}]^2} = 1.022 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$V_{eff_{MTE}} = \frac{[1.022 \text{ } ^\circ\text{C}]^4}{\frac{[0.9705 \text{ } ^\circ\text{C}]^4}{\infty} + \frac{[0.2887 \text{ } ^\circ\text{C}]^4}{\infty} + \frac{[0.1364 \text{ } ^\circ\text{C}]^4}{19}} = 19 * 7.5^4 \approx \infty$$

Por lo tanto, el sistema de medición MTE registra una medición de temperatura nominal de 27°C con una incertidumbre en la medición de 1.022 °C con un grado de libertad total de  $\infty$ .

### 1.3 Incertidumbre en el Error del Sistema de Medición a Calibrar (UUT)

#### 1.3.1 Incertidumbre en el Bloque 1 (Sensor de Temperatura LM35)

El bloque 1 de medición que constituye en UUT consta del transductor de temperatura LM35, cuya ecuación nominal es  $Salida_{B1}(mV) = G * T_{Real} \rightarrow$  Donde:  $G = 10 \frac{mV}{^{\circ}C}$ .

**Tabla 16**

*Identificación e Incertidumbre de las Fuentes de Error del LM35*

Parámetro	Tipo de Análisis para Calcular su Incertidumbre	Distribución de Probabilidad del Error	Valor Nominal	Límites de Tolerancia	Probabilidad de Ocurrencia	Incertidumbre Estándar
-Ganancia del Sensor (G)	Tipo B	Normal	10 mV/°C	± 0.2 mV/°C	95 %	0.1020 mV/°C
-No Linealidad (NL <sub>B1</sub> )	Tipo B	Normal	0 °C	± 0.3 °C	95 %	0.1531 °C
-Regulación de Alimentación (RA)	Tipo B	Normal	0 mV/V	± 0.02 mV/V	95 %	0.010 mV/V
-Estabilidad a Largo Plazo (ELP)	Tipo B	Normal	0 °C	± 0.08 °C	95 %	0.041 °C
-Voltaje de Alimentación (F)	Tipo B	Normal	5 V	± 0.25 V	99 %	0.0971 V
-T <sub>REAL</sub> (Promedio Medido)	-	-	27 °C	-	-	-
-Salida <sub>B1</sub>	-	-	270 mV	-	-	-

Fuente: Hoja de Datos del LM35 y Elaboración Propia.

Incorporando las fuentes de error identificadas en el modelo matemático, y obteniendo la ecuación de error en la salida del bloque 1 se tiene:

$$Salida_{B1}(mV) = G \left[ \frac{mV}{^{\circ}C} \right] * (T_{Real}[^{\circ}C] + NL_{B1}[^{\circ}C] + ELP[^{\circ}C]) + F[V] * RA \left[ \frac{mV}{V} \right]$$

$$e_{Salida_{B1}}(mV) = 27^{\circ}C * e_G \frac{mV}{^{\circ}C} + 10 \frac{mV}{^{\circ}C} * e_{NL_{B1}} ^{\circ}C + 10 \frac{mV}{^{\circ}C} * e_{ELP} ^{\circ}C + 5V * e_{RA} \frac{mV}{V} + 0 \frac{mV}{V} * e_F V$$

$$\mu(e_{Salida_{B1}}) = \sqrt{[27 * \mu(e_G)]^2 + [10 * \mu(e_{NL_{B1}})]^2 + [10 * \mu(e_{ELP})]^2 + [5 * \mu(e_{RA})]^2 + 0 * \mu(e_F)^2}$$

$$= 3.1780 mV$$

Por ende, el valor nominal de la salida del bloque 1 es 270 mV con una incertidumbre de 3.1780 mV y dado que todos los errores son del Tipo B, el grado de libertad total es de ∞.

### 1.3.2 Incertidumbre en el Bloque 2 (Op amp 1, Seguidor de Tensión)

El bloque 2 consta de un amplificador operacional (OP AMP) LM358 en modo seguidor de tensión, cuyo modelo matemático nominal es  $Salida_{B2} (mV) = Entrada_{B2} = Salida_{B1} (mV)$ .

**Tabla 17**

*Identificación e Incertidumbre de las Fuentes de Error del LM358*

Parámetro	Tipo de Análisis para Calcular su Incertidumbre	Distribución de Probabilidad del Error	Valor Nominal	Límites de Tolerancia	Probabilidad de Ocurrencia	Incertidumbre Estándar
-Error en la Salida del Bloque 1 (Salida <sub>B1</sub> )	-	-	270 mV	-	-	3.1780 mV
-Voltaje Offset (V <sub>IO-B2</sub> )	Tipo B	Normal	0 mV	± 2 mV	95 %	1.0204 mV
-Razón de Rechazo al Modo Común (CMRR <sub>B2</sub> )	Tipo B	Normal	85 db = 17783	-	-	-
-Razón de Rechazo al Voltaje de Alimentación (PSRR <sub>B2</sub> )	Tipo B	Normal	100 db = 100000	-	-	-
- F	Tipo B	Normal	5 V	± 0.25 V	99 %	0.0971 V
-Coeficiente Térmico del Voltaje Offset (CT <sub>B2</sub> )	Tipo B	Normal	0 uV/°C	± 7 uV/°C	95 %	3.5714 uV/°C
-T <sub>Real</sub>	-	-	27 °C	-	-	-
-Salida <sub>B2</sub>	-	-	<b>270.07 mV</b>	-	-	-

Fuente: Hoja de Datos del LM358 y Elaboración Propia.

Incorporando estas fuentes de error identificadas en la ecuación nominal tenemos:

$$Salida_{B2} (mV) = Salida_{B1} (mV) + \frac{Salida_{B1} (mV)}{CMRR_{B2}} + \frac{F (V)}{PSRR_{B2}} * 10^3 \left(\frac{mV}{V}\right) + V_{IO-B2} (mV) + CT_{B2} \left(\frac{uV}{^{\circ}C}\right) * 10^{-3} \left(\frac{mV}{uV}\right) * [T_{Real} (^{\circ}C) - 25 ^{\circ}C]$$

$$e_{Salida_{B2}} (mV) = \left[1 + \frac{1}{17783}\right] * e_{Salida_{B1}} (mV) + e_{V_{IO-B2}} (mV) + \frac{10^3 \left(\frac{mV}{V}\right)}{10^5} * e_F (V) + 10^{-3} \left(\frac{mV}{uV}\right) * [2 ^{\circ}C] * e_{CT_{B2}} \left(\frac{uV}{^{\circ}C}\right)$$

$$\mu(e_{Salida_{B2}}) = \sqrt{[1]^2 * \mu(e_{Salida_{B1}})^2 + \mu(e_{V_{IO-B2}})^2 + (10^{-2})^2 * \mu(e_F)^2 + (20^{-3})^2 * \mu(e_{CT_{B2}})^2} = \mathbf{3.3378 mV}$$

Por ende, el valor nominal de la salida del bloque 2 es 270.07 mV con una incertidumbre de 3.3378 mV y dado que todos los errores son del Tipo B, el grado de libertad total es de ∞.

### 1.3.3 Incertidumbre en el Bloque 3 (Op amp No inversor)

El bloque 3 consta de un amplificador operacional en modo no inversor, cuyo modelo

matemático nominal está dado por  $Salida_{B3} (mV) = Salida_{B2} (mV) * (1 + \frac{R2 \Omega}{R1 \Omega})$ .

**Tabla 18**

*Identificación e Incertidumbre de Errores del LM358 (no inversor)*

Parámetro	Tipo de Análisis para Calcular su Incertidumbre	Distribución de Probabilidad del Error	Valor Nominal	Límites de Tolerancia	Probabilidad de Ocurrencia	Incertidumbre Estándar
-Error en la Salida del Bloque 2 (Salida <sub>B2</sub> )	-	-	270.07 mV	-	-	3.3378 mV
-V <sub>IO-B3</sub>	Tipo B	Normal	0 mV	± 2 mV	95 %	1.0204 mV
-CMRR <sub>B3</sub>	Tipo B	Normal	85 db = 17783	-	-	-
-PSRR <sub>B3</sub>	Tipo B	Normal	100 db = 100000	-	-	-
-F	Tipo B	Normal	5 V	± 0.25 V	99 %	0.0971 V
-CT <sub>B3</sub>	Tipo B	Normal	0 uV/°C	± 7 uV/°C	95 %	3.5714 uV/°C
-Offset en la Corriente de Entrada (I <sub>IO-B3</sub> )	Tipo B	Normal	0 nA	± 2 nA	95 %	1.0204 nA
-Bias en la Corriente de Entrada (I <sub>B-B3</sub> )	Tipo B	Normal	0 nA	± 20 nA	95 %	10.2041 nA
-Coeficiente Térmico de I <sub>B</sub> (CT <sub>IO-B3</sub> )	Tipo B	Normal	0 pA/°C	± 10 pA/°C	95 %	5.1020 pA/°C
-Resistencia de Realimentación (R2)	Tipo B	Normal	47 KΩ	± 5 % = ± 2350 Ω	95 %	1199 Ω
-Resistencia Terminal Inversor (R1)	Tipo B	Normal	12 KΩ	± 5 % = ± 600 Ω	95 %	306 Ω
-T <sub>Real</sub>	-	-	27 °C	-	-	-
-Salida <sub>B3</sub>	-	-	<b>1328.17 mV</b>	-	-	-

Fuente: Hoja de Datos del LM358 y Elaboración Propia.

Incorporando las fuentes de error en el modelo matemático nominal, tenemos:

$$\begin{aligned}
 Salida_{B3} (mV) &= \left[ Salida_{B2}(mV) + \frac{Salida_{B2}(mV)}{CMRR_{B3}} + \frac{F(V)}{PSRR_{B3}} 10^3 \left( \frac{mV}{V} \right) + V_{IO-B3}(mV) + CT_{B3} \left( \frac{\mu V}{^\circ C} \right) \right. \\
 &\quad \left. * 10^{-3} \left( \frac{mV}{\mu V} \right) * [T_{Real}(^\circ C) - 25^\circ C] \right] * \left( 1 + \frac{R2 \Omega}{R1 \Omega} \right) \\
 &\quad + \left\{ \frac{\left[ I_{IO-B3}(nA) * 10^{-6} \left( \frac{mA}{nA} \right) + CT_{IO-B3} \left( \frac{pA}{^\circ C} \right) * 10^{-9} \left( \frac{mA}{pA} \right) * [T_{Real}(^\circ C) - 25^\circ C] \right]}{2} \right. \\
 &\quad \left. - I_{IB-B3}(nA) * 10^{-6} \left( \frac{mA}{nA} \right) \right\} * R2 \Omega \\
 e_{Salida-B3}(mV) &= 4.92 * e_{Salida_{B2}}(mV) + 0.049 \left( \frac{mV}{V} \right) * e_F(V) + 4.92 * e_{V_{IO-B3}}(mV) + 0.01 \left( \frac{mV * ^\circ C}{\mu V} \right) \\
 &\quad * e_{CT_{B3}} \left( \frac{\mu V}{^\circ C} \right) + 0.023 \left( \frac{mV}{\Omega} \right) * e_{R2}(\Omega) - 0.088 \left( \frac{mV}{\Omega} \right) * e_{R1}(\Omega) + 0.024 \left( \frac{mV}{nA} \right) * e_{I_{IO-B3}}(nA) \\
 &\quad + 4.7 * 10^{-5} \left( \frac{mV * ^\circ C}{pA} \right) * e_{CT_{IO-B3}} \left( \frac{pA}{^\circ C} \right) - 0.047 \left( \frac{mV}{nA} \right) * e_{I_{IB-B3}}(nA) \\
 \mu(e_{Salida-B3})^2 &= 4.92^2 * \mu(e_{Salida_{B2}})^2 + 0.049^2 * \mu(e_F)^2 + 4.92^2 * \mu(e_{V_{IO-B3}})^2 + 0.01^2 * \mu(e_{CT_{B3}})^2 + 0.023^2 \\
 &\quad * \mu(e_{R2})^2 + 0.088^2 * \mu(e_{R1})^2 + 0.024^2 * \mu(e_{I_{IO-B3}})^2 + (4.7 * 10^{-5})^2 * \mu(e_{CT_{IO-B3}})^2 + 0.047^2 \\
 &\quad * \mu(e_{I_{IB-B3}})^2 \\
 \mu(e_{Salida-B3}) &= 42.32 mV
 \end{aligned}$$

Por ende, el valor nominal de la salida del bloque 3 es 1328.17 mV con una incertidumbre de 42.32 mV y dado que todos los errores identificados son del Tipo B, el grado de libertad total es de  $\infty$ .

### 1.3.4 Incertidumbre en el Bloque 4 (Convertor ADC, Atmega328p)

El bloque 4 incorpora el convertor analógico-digital (ADC) integrado en el microcontrolador Atmega328p, el cual al tener una resolución de 10bits, cuyo modelo matemático

$$\text{nominal esta dado por } Salida_{B4}(LSB) = \frac{Salida_{B3}(mV) * 10^{-3} \left( \frac{V}{mV} \right)}{\frac{F_{REF}(V)}{1024 (LSB)}}$$

**Tabla 19**

*Identificación e Incertidumbre de Errores del ADC del Atmega328p*

Parámetro	Tipo de Análisis para Calcular su Incertidumbre	Distribución de Probabilidad del Error	Valor Nominal	Límites de Tolerancia	Probabilidad de Ocurrencia	Incertidumbre Estándar
-Salida <sub>B3</sub>	-	-	1328.17 mV	-	-	42.32 mV

-Error de Offset (ADC <sub>OFFSET</sub> )	Tipo B	Normal	0 LSB	± 1 LSB	99 %	0.3882 LSB
-Error de Ganancia (ADC <sub>EG</sub> )	Tipo B	Normal	0 LSB	± 1.5 LSB	99 %	0.5823 LSB
-No Linealidad Integral (ADC <sub>INL</sub> )	Tipo B	Normal	0 LSB	± 1 LSB	99 %	0.3882 LSB
-No Linealidad Diferencial (ADC <sub>DNL</sub> )	Tipo B	Normal	0 LSB	± 1 LSB	99 %	0.3882 LSB
- Cuantización (ADC <sub>EQ</sub> )	Tipo B	Uniforme	0 LSB	± 0.5 LSB	100 %	0.2887 LSB
-F <sub>REF</sub>	Tipo B	Normal	5 V	± 0.25 V	99 %	0.0971 V
-Salida <sub>B4</sub>	-	-	<b>272 LSB</b>	-	-	-

Fuente: Hoja de Datos del Atmega328p y Elaboración Propia.

Incorporando las fuentes de errores identificadas del bloque 4, en su ecuación ideal, tomando en cuenta las unidades de cada error, tenemos la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}
 & \text{Salida}_{B4}(\text{LSB}) \\
 &= \frac{[1024 + \text{ADC}_{\text{OFFSET}} + \text{ADC}_{\text{EG}} + \text{ADC}_{\text{INL}} + \text{ADC}_{\text{DNL}} + \text{ADC}_{\text{EQ}}](\text{LSB}) * \text{Salida}_{B3}(\text{mV}) * 10^{-3} \left(\frac{\text{V}}{\text{mV}}\right)}{F_{\text{REF}}(\text{V})} \\
 e_{\text{Salida}_{B4}}(\text{LSB}) &= 0.2048 \left(\frac{\text{LSB}}{\text{mV}}\right) * e_{\text{Salida}_{B3}}(\text{mV}) + 0.2657 * e_{\text{ADC}_{\text{OFFSET}}}(\text{LSB}) + 0.2657 * e_{\text{ADC}_{\text{EG}}}(\text{LSB}) \\
 &+ 0.2657 * e_{\text{ADC}_{\text{INL}}}(\text{LSB}) + 0.2657 * e_{\text{ADC}_{\text{DNL}}}(\text{LSB}) + 0.2657 * e_{\text{ADC}_{\text{EQ}}}(\text{LSB}) - 108.8 \left(\frac{\text{LSB}}{\text{V}}\right) \\
 &* e_{F_{\text{REF}}}(\text{V}) \\
 \mu(e_{\text{Salida}_{B4}})^2 &= 0.2048^2 * \mu(e_{\text{Salida}_{B3}})^2 + 0.2657^2 * \mu(e_{\text{ADC}_{\text{OFFSET}}})^2 + 0.2657^2 * \mu(e_{\text{ADC}_{\text{EG}}})^2 + 0.2657^2 \\
 &* \mu(e_{\text{ADC}_{\text{INL}}})^2 + 0.2657^2 * \mu(e_{\text{ADC}_{\text{DNL}}})^2 + 0.2657^2 * \mu(e_{\text{ADC}_{\text{EQ}}})^2 + 108.8^2 * \mu(e_{F_{\text{REF}}})^2 \\
 \mu(e_{\text{Salida}_{B4}}) &= \mathbf{13.67 \text{ LSB}}
 \end{aligned}$$

Por ende, el valor nominal de la salida del bloque 4 es 272 LSB con una incertidumbre de 13.67 LSB y dado que todos los errores son del Tipo B, posee un grado de libertad de  $\infty$ .

### 1.3.5 Incertidumbre en el Bloque 5 (Ecuación Lineal para Interpretar la Temperatura Medida)

El presente bloque, el cual es el último bloque del sistema de medición del UUT, representa la salida total del sistema del UUT, está compuesto por una ecuación lineal que relaciona la salida

del bloque 4 (lectura del ADC), y su interpretación en °C medida, cuyo modelo está dado por

$$Salida_{B5} (°C) = Salida_{B4} (LSB) * \frac{5 (V) * 10^3 \left(\frac{mV}{V}\right)}{1024 (LSB)} * \frac{1}{10 \left(\frac{mV}{°C}\right)} * \left(\frac{1}{1 + \frac{47 (K\Omega)}{12 (K\Omega)}}\right).$$

**Tabla 20**

*Identificación e Incertidumbre del Procesamiento de Datos*

Parámetro	Tipo de Análisis para Calcular su Incertidumbre	Distribución de Probabilidad del Error	Valor Nominal	Límites de Tolerancia	Probabilidad de Ocurrencia	Incertidumbre Estándar
-Salida <sub>B4</sub>	-	-	272 LSB	-	-	13.67 LSB
-Resolución ( $e_{Res,B5}$ )	Tipo B	Uniforme	0 °C	± 0.05 °C	100 %	0.0289 °C
-Repetitividad ( $e_{Rep,B5}$ )	Tipo A (Toma de 20 Lecturas)	Normal	0 °C	-	-	0.2572 °C
-Salida <sub>B5</sub>	-	-	<b>29.8 °C</b>	-	-	-

Fuente: Elaboración Propia.

Incluyendo las fuentes de error identificadas en la ecuación nominal, tomando como referencia las unidades de los errores, tenemos que la ecuación de salida del UUT es:

$$Salida_{B5} (°C) = Salida_{B4} (LSB) * \frac{5 (V) * 10^3 \left(\frac{mV}{V}\right)}{1024 (LSB)} * \frac{1}{10 \left(\frac{mV}{°C}\right)} * \left(\frac{1}{1 + \frac{47 (K\Omega)}{12 (K\Omega)}}\right) + e_{Res,B5} (°C) + e_{Rep,B5} (°C)$$

$$e_{Salida_{B5}} (°C) = 0.09931 \left(\frac{°C}{LSB}\right) * e_{Salida_{B4}} (LSB) + 1 * e_{Res,B5} (°C) + 1 * e_{Rep,B5} (°C)$$

$$\mu(e_{Salida_{B5}}) = \sqrt{0.09931^2 * \mu(e_{Salida_{B4}})^2 + \mu(e_{Res,B5})^2 + \mu(e_{Rep,B5})^2} = \mathbf{1.382 °C}$$

$$V_{eff,UUT} = \frac{[1.382 °C]^4}{\frac{[0.09931 \left(\frac{°C}{LSB}\right) * 13.67 LSB]^4}{\infty} + \frac{[0.0289 °C]^4}{\infty} + \frac{[0.2572 °C]^4}{19}} = 15838 \approx \infty$$

Por lo tanto, el sistema de medición UUT registra una medición de temperatura nominal de 29.8 °C con una incertidumbre en la medición de 1.382 °C con un grado de libertad total de ∞.

#### 1.4 Resultado de la Calibración del Sistema de Medición (UUT)

El resultado de la calibración es un estimado del error sistemático del UUT ( $e_{b,UUT}$ ), cuya estimación está dada por  $\delta = x_{UUT} - y_{MTE} = 29.8 °C - 27 °C = \mathbf{2.8 °C}$ . Finalmente, se procede a calcular la incertidumbre en el resultado de la calibración.

$$\mu(\epsilon_{cal}) = \sqrt{\mu(e_{m,MTE})^2 + \mu(e_{Otros,UUT})^2} = \sqrt{(1.022 °C)^2 + (1.382 °C)^2} = \mathbf{1.71884 °C}$$

Con dicha incertidumbre en el error de calibración, se pueden formular límites de tolerancia que contengan al error de calibración real con una probabilidad de ocurrencia correspondiente. Para la presente tesis, se hallarán los límites de tolerancia del error de calibración con un 90 % de nivel de confianza, y teniendo en cuenta que los grados de libertad de la calibración son  $\infty$ . Los límites computados son  $\epsilon_{cal} = \pm 1.645 * 1.71884 \text{ } ^\circ\text{C} = \pm 2.8275 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Es decir, el error sistemático del UUT está esperado a tener un valor de  $\delta = e_{b,UUT} = 2.8 \text{ } ^\circ\text{C} \pm 2.8275 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

## 2. Operación, Pruebas y Resultados Experimentales del Módulo

### 2.1 Identificación de las Partes Funcionales del Módulo

Para poder realizar las pruebas experimentales, se procede primero a identificar las partes funcionales del módulo, para de esa manera poder detallar la operabilidad del mismo con mayor claridad.

#### Figura 31

*Identificación de las Partes Principales del Módulo en su Operación Manual*



Fuente: Elaboración Propia.

## ***2.2 Operación y Realización de Pruebas Experimentales del Módulo en Modo Manual***

Las pruebas realizadas sobre el módulo en la presente tesis están enfocadas en demostrar la capacidad de inercia térmica en los sistemas de calefacción por suelo radiante, lo cual se pretende llevar a cabo calentando el agua de abastecimiento del módulo a una temperatura alrededor de 60 °C (para reducir el tiempo de la toma de datos de las pruebas), y al hacer circular el agua caliente por las tuberías enterradas en la capa de arena de la cámara de pruebas, registrar el incremento de la temperatura interior y de la superficie de arena medidas. Al haber incrementado dichas temperaturas por un par de °C, se procede a apagar la bomba hidráulica para que deje de circular agua caliente, y se abre la tapa de la cámara de pruebas para renovar el aire interior, con lo que se pretende demostrar que, a diferencia de otros sistemas que calientan principalmente el aire, la temperatura tanto de la arena como interior de la cámara de pruebas, no disminuye bruscamente. Si bien solo se consideró este tipo de pruebas experimentales para la presente tesis, es posible utilizar el módulo para probar la mejora rendimiento de tiempo de calefacción al utilizar otros fluidos como por ejemplo nanofluidos en el fluido de trabajo. También, al ser la superficie del suelo del módulo, de arena, es posible removerla para poder recubrir las tuberías de cobre con materiales que mejoren la conductividad térmica.

### **2.2.1 Pasos para la Puesta en Marcha del Módulo**

Para el encendido del módulo para su operación en modo manual, primero se procede a abrir el gabinete eléctrico del módulo para verificar que todas las palancas estén bajadas y los selectores del panel de control estén apagados. Seguidamente, enchufamos el módulo, comprobando que haya una lectura de tensión en el voltímetro, y procedemos a subir las palancas de alimentación general (las 2 llaves superiores), así como también las palancas de cada resistencia calefactora (las 2 llaves inferiores, al lado del contactor).

### Figura 32

#### Encendido del Módulo, Paso 1

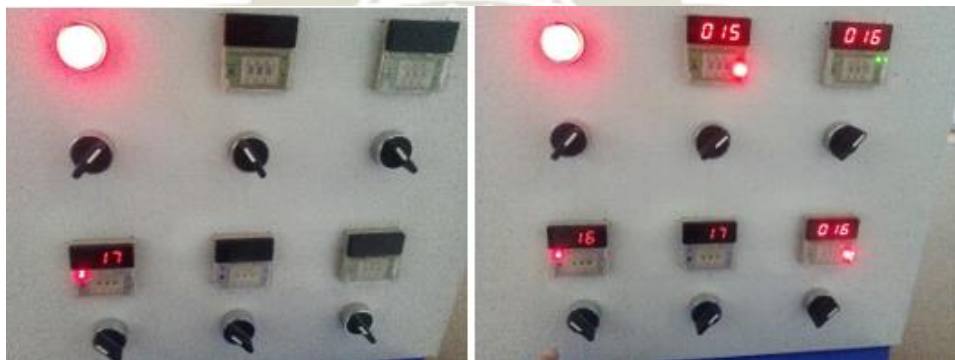


Fuente: Elaboración Propia.

Seguidamente, antes de encender los termostatos, se fija una temperatura deseada del agua de abastecimiento del módulo, en el controlador de la esquina superior derecha del panel de control y en el de la esquina inferior izquierda. Una vez fijada dicha temperatura, se procede a encender el selector general (debajo del foco), con lo cual deberá encender solamente el termostato que se ubica debajo de dicho selector, posteriormente se procede a encender los demás selectores, donde el resto de selectores controla el encendido del termostato que se ubica encima de ellos, excepto el selector de la esquina inferior izquierda, ya que ese selector controla el encendido de la bomba.

### Figura 33

#### Encendido del Módulo, Paso 2



Fuente: Elaboración Propia.

### 2.2.2 Resultados de las Pruebas Experimentales

Dado que la temperatura exterior a la cámara de pruebas del módulo no estará sujeta a variaciones bruscas ya que se asume que el módulo estará en un recinto cerrado, se utilizará el sensor que mide la temperatura de la superficie de arena del módulo, para registrar la temperatura exterior al momento de iniciada la prueba, y una vez registrado dicho dato, se vuelve a colocar el sensor enterrado en la superficie de arena. Para la presente prueba, se fijó una temperatura del agua de 50 °C, la cual en el minuto 40 se aumentó a 60 °C por razones que se explicarán más adelante, para posteriormente en el minuto 60, apagar el sistema entero, abriendo la tapa de la cámara de pruebas. En esta toma de datos, se utilizaron los controles XMTG-2301-J.

**Tabla 21**

*Resultados de la Prueba de Funcionamiento del Módulo (XMTG-2301-J)*

Temp. Exterior (°C)		18 °C								
Temp. Superficie de Arena (°C)	Valor Inicial	Valor Medido Transcurrido el Tiempo Especificado (En el minuto 60, apagar la bomba y abrir la tapa del módulo)								
		10 min	20 min	30 min	40 min	50 min	60 min	70 min	80 min	90 min
	18 °C	19 °C	23 °C	28 °C	31 °C	33 °C	36 °C	37 °C	35 °C	33 °C
Temp. Interior (°C)	Valor Inicial	Valor Medido Transcurrido el Tiempo Especificado (En el minuto 60, apagar la bomba y abrir la tapa del módulo)								
		10 min	20 min	30 min	40 min	50 min	60 min	70 min	80 min	90 min
	20 °C	20 °C	21 °C	22 °C	22 °C	23 °C	24 °C	24 °C	24 °C	23 °C
Temp. Tanque de Agua (°C)	Valor Inicial	Valor Medido Transcurrido el Tiempo Especificado (En el minuto 60, apagar la bomba y abrir la tapa del módulo)								
		10 min	20 min	30 min	40 min	50 min	60 min	-		
	17 °C	31 °C	48 °C	49 °C	48 °C	59 °C	59 °C	-		
Temp. Agua Impulso (°C)	Valor Inicial	Valor Medido Transcurrido el Tiempo Especificado (En el minuto 60, apagar la bomba y abrir la tapa del módulo)								
		10 min	20 min	30 min	40 min	50 min	60 min	-		
	19 °C	26 °C	38 °C	42 °C	42 °C	47 °C	50 °C	-		
Temp. Agua Retorno (°C)	Valor Inicial	Valor Medido Transcurrido el Tiempo Especificado (En el minuto 60, apagar la bomba y abrir la tapa del módulo)								
		10 min	20 min	30 min	40 min	50 min	60 min	-		
	18 °C	35 °C	50 °C	49 °C	49 °C	51 °C	59 °C	-		

Presión Impulso (bar)	Valor Inicial	Valor Medido Transcurrido el Tiempo Especificado (En el minuto 60, apagar la bomba y abrir la tapa del módulo)						
		10 min	20 min	30 min	40 min	50 min	60 min	-
0.4 bar		0.4 bar	0.4 bar	0.4 bar	0.4 bar	0.4 bar	0.4 bar	-
Presión Retorno (bar)	Valor Inicial	Valor Medido Transcurrido el Tiempo Especificado (En el minuto 60, apagar la bomba y abrir la tapa del módulo)						
		10 min	20 min	30 min	40 min	50 min	60 min	-
0.05 bar		0.05 bar	0.05 bar	0.05 bar	0.05 bar	0.05 bar	0.05 bar	-
Lectura Hidrómetro (Lt)	Valor Inicial	Valor Medido Transcurrido el Tiempo Especificado (En el minuto 60, apagar la bomba y abrir la tapa del módulo)						
		10 min	20 min	30 min	40 min	50 min	60 min	-
2570 Lt		2622 Lt	2693 Lt	2761 Lt	2828 Lt	2894 Lt	2960 Lt	-

Fuente: Elaboración Propia.

De los resultados, se puede apreciar que, al hacer circular agua caliente por las tuberías enterradas en la superficie de arena, la temperatura del suelo se incrementa y esto causa que la temperatura medida en el interior de la cámara de pruebas se incremente. Sin embargo, al darse la transferencia de calor por convección natural y por radiación, se tienen tiempos largos para poder apreciar incrementos de temperatura al interior, pero esto también es favorable ya que tras apagar el sistema de calefacción y abrir la tapa del recinto en el minuto 60 de la prueba, se observa que la temperatura de la superficie de arena y la interior de la cámara de pruebas decrecen más lentamente que el tiempo que les tomó incrementar, habiendo un retardo en las variaciones bruscas de temperatura (inercia térmica). Otra observación que se puede hacer de los resultados experimentales obtenidos es que la temperatura del agua al retorno da una lectura mayor que la temperatura del agua al ingreso del sistema. Esto puede deberse por tres motivos, primero que la tubería del agua de retorno está ubicada por encima de la bomba hidráulica, recalentando ligeramente dicha tubería, además de estar más cerca del tanque de abastecimiento de agua caliente del módulo y al ser el circuito hidráulico corto, y al estar ubicado la tubería de retorno a una altura mayor que la tubería de impulsión, el agua calentada tiende a elevarse hacia arriba y el agua fría

hacia abajo. Finalmente, el hecho de que al estar el agua en movimiento la transferencia de calor será mayor hacia el sensor que mide la temperatura de retorno, mientras que el sensor que mide el tanque de agua, esta esencialmente sin movimiento y por ende dicha lectura es menor.

### ***2.3 Operación y Pruebas de Funcionamiento del Sistema Electrónico del Módulo***

Para la operación del módulo mediante la interfaz de usuario en Labview, primero es necesario encender el módulo como si de su operación manual se tratase, con la diferencia de que las palancas que controlan a cada resistencia calefactora se encuentren bajadas, y también el selector que controla el encendido de la bomba se encuentre apagado. Además, el contactor que controla ambas resistencias calefactoras debe estar encendido, lo cual se logra fijando una temperatura del tanque de agua elevada en el termostato.

#### **Figura 34**

##### *Incorporación del Sistema Electrónico del Módulo*

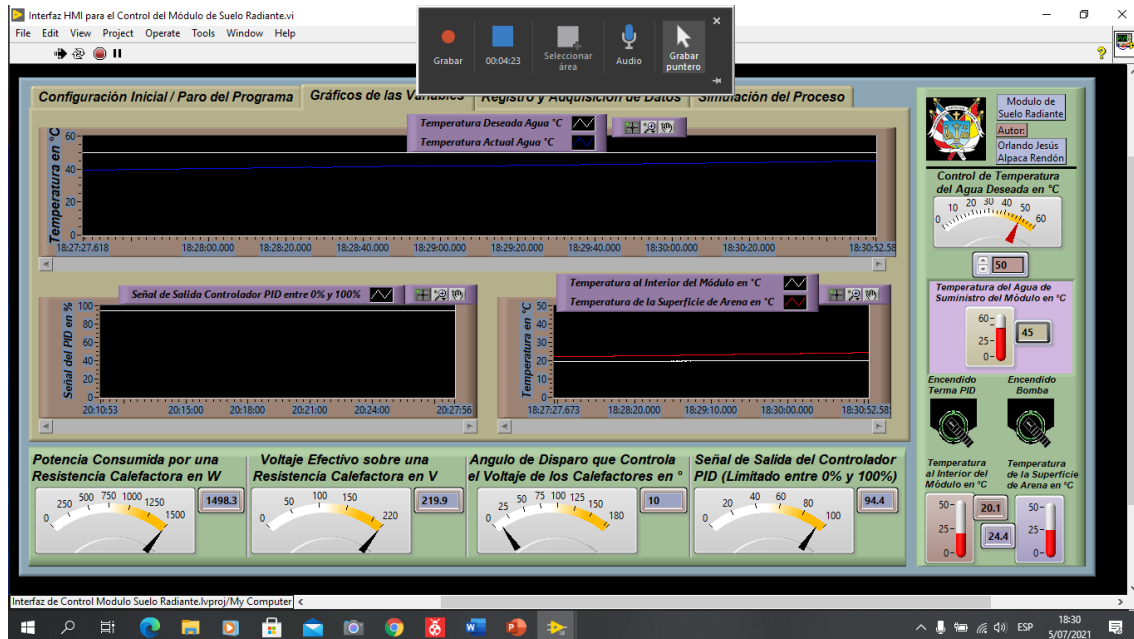


*Fuente:* Elaboración Propia.

Finalmente, se enchufa el sistema electrónico del módulo y se ejecuta el programa en Labview, el cual registrará los datos de temperatura del agua, de la arena y del ambiente interior, guardando registro de ellos en un archivo de texto. El controlador PID digital regulará el voltaje sobre cada resistencia calefactora.

**Figura 35**

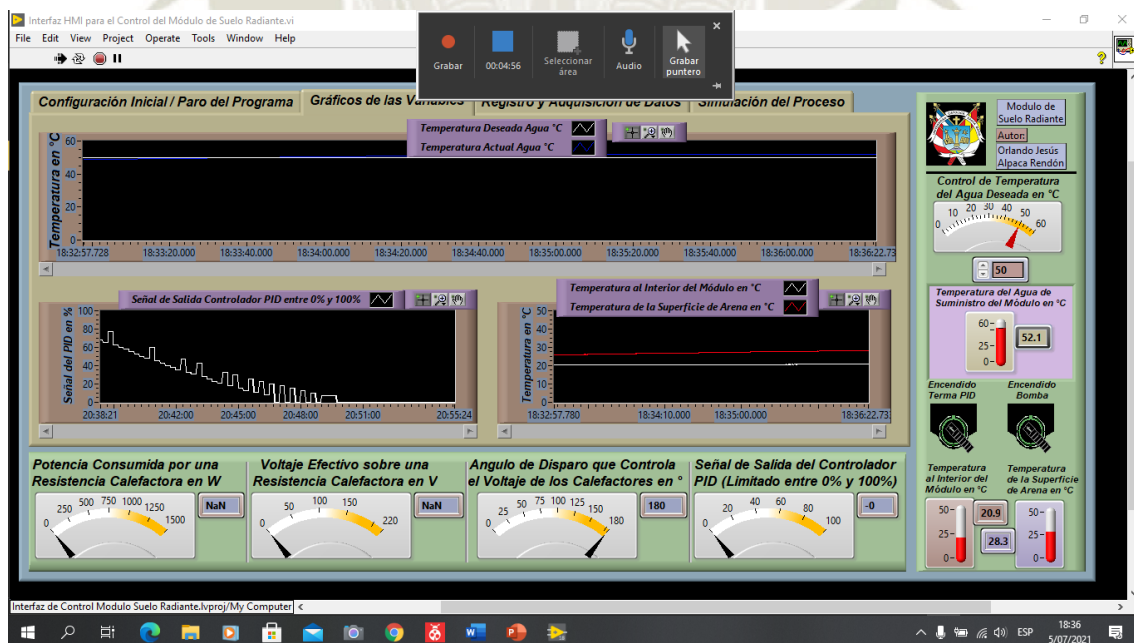
*Funcionamiento de la Interfaz de Usuario y el Controlador PID (1)*



Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 36**

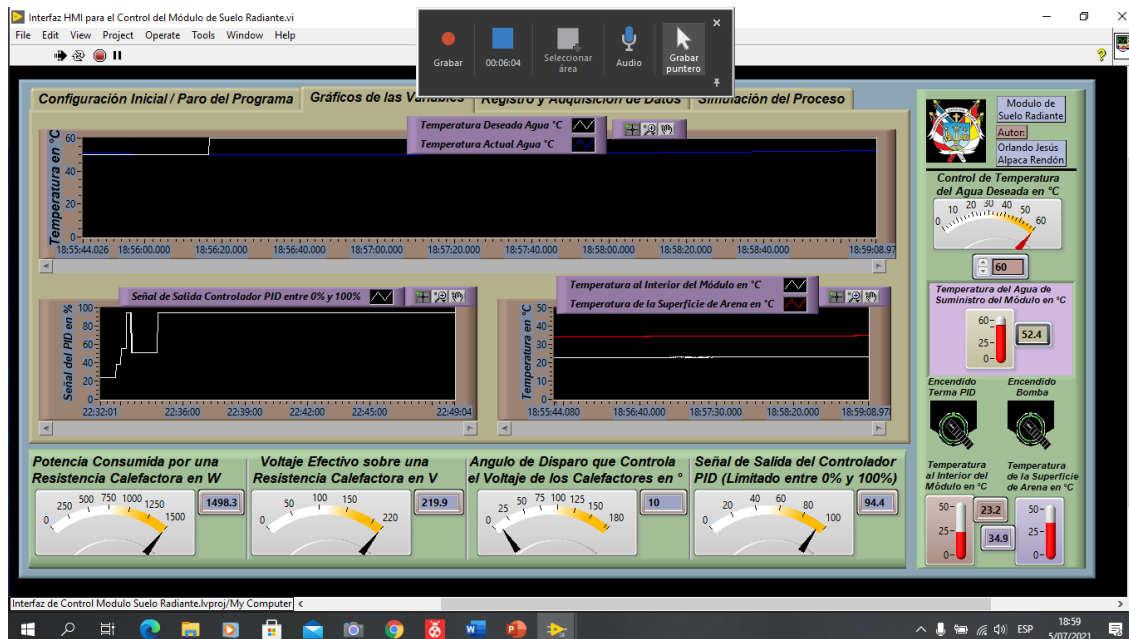
*Funcionamiento de la Interfaz de Usuario y el Controlador PID (2)*



Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 37**

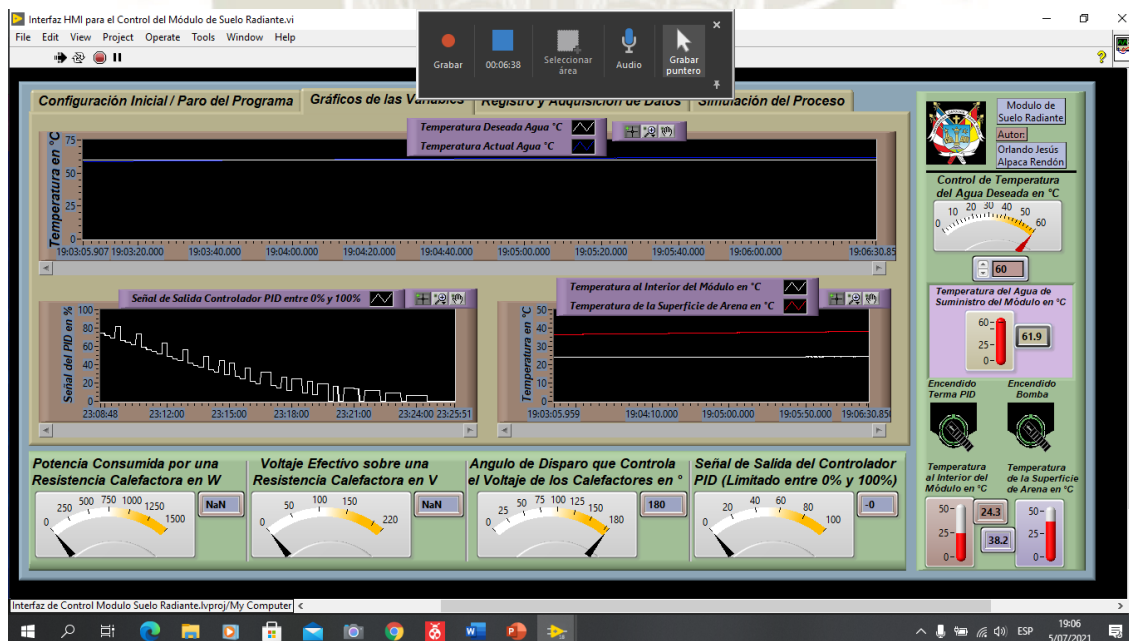
*Funcionamiento de la Interfaz de Usuario y el Controlador PID (3)*



Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 38**

*Funcionamiento de la Interfaz de Usuario y el Controlador PID (4)*



Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 39**

*Comprobación del Control de Voltaje sobre las Resistencias Calefactoras*



Fuente: Elaboración Propia.

El registro de datos controlando el módulo mediante la interfaz de usuario en Labview y el microcontrolador Atmega328p, se dio simultáneamente al registro de datos utilizando las lecturas de los controladores XMTG-2301-J, para de esa manera, evaluar las variaciones en las lecturas de temperatura dadas por el XMTG-2301-J y el sistema de medición diseñado utilizando el sensor LM35. Por lo tanto, el motivo por el cual se fijó una temperatura deseada del agua (controlada por el control PID digital diseñado en la presente tesis) de 50 °C hasta el minuto 40, y luego se cambió a 60 °C fue precisamente para probar el desempeño de dicho controlador.

**Tabla 22**

*Prueba Experimental del Módulo (Sistema Electrónico)*

Temp. Exterior (°C)		18.3 °C								
Temp. Superficie de Arena (°C)	Valor Inicial	Valor Medido Transcurrido el Tiempo Especificado (En el minuto 60, apagar la bomba y abrir la tapa del módulo)								
		10 min	20 min	30 min	40 min	50 min	60 min	70 min	80 min	90 min
	17.5 °C	20.8 °C	27.6 °C	31.7 °C	34.1 °C	37.5 °C	40.5 °C	39.5 °C	36.4 °C	33.7 °C
Temp. Interior (°C)		Valor Medido Transcurrido el Tiempo Especificado (En el minuto 60, apagar la bomba y abrir la tapa del módulo)								
	Valor Inicial	10 min	20 min	30 min	40 min	50 min	60 min	70 min	80 min	90 min
	18.9 °C	19.5 °C	20.7 °C	21.7 °C	22.6 °C	24.1 °C	25.0 °C	24.3 °C	23.6 °C	23.3 °C
Temp. Tanque de Agua (°C)		Valor Medido Transcurrido el Tiempo Especificado (En el minuto 60, apagar la bomba y abrir la tapa del módulo)								
	Valor Inicial	10 min	20 min	30 min	40 min	50 min	60 min	-		
	19.2 °C	33.5 °C	51.5 °C	51.0 °C	50.8 °C	61.1 °C	60.7 °C	-		

Fuente: Elaboración Propia.

## CONCLUSIONES

- Se completó el diseño y se logró la implementación del módulo experimental de un sistema de calefacción por suelo radiante por agua, con el cual es posible monitorear y manipular los parámetros funcionales del mismo, facilitando el análisis de los resultados de las pruebas experimentales realizadas con el módulo. Todo esto tomando en cuenta una buena compatibilidad acorde a la ubicación del módulo (laboratorio de termo-fluidos de la UCSM).
- Se consiguió llevar a cabo el diseño mecánico del sistema de calefacción por suelo radiante a escala, realizado con la aplicación de conceptos de transferencia de calor, siendo un enfoque alternativo al procedimiento de diseño propuesto por la normativa UNE-EN 1264. Sin embargo, si se tomó como referencia recomendaciones de diversos manuales de instalación de este tipo de sistemas basados en dicha normativa.
- Se logró integrar un sistema electrónico al módulo por suelo radiante, de manera que el módulo pueda ser manipulado tanto manualmente como mediante una computadora (mediante una interfaz de usuario en Labview y el microcontrolador Atmega328p).
- Se desarrolló un controlador digital PID en su forma modificada PI-D para controlar la temperatura del agua del tanque de abastecimiento del módulo. Dicho controlador digital se implementó de manera que solo entrará en funcionamiento cuando el módulo se esté operando mediante una computadora, ya que cuando el módulo se opere manualmente dicho parámetro es regulado mediante los controladores manuales seleccionados XMTG-2301-J.
- Se llevó a cabo la calibración del sistema de medición de temperatura diseñado para cuando se opere el módulo mediante una computadora (con el sensor LM35). Para ello se realizó un análisis de incertidumbre en sus mediciones tomando como referencia la medición del controlador XMTG-2301-J, el cual monitorea la temperatura con una termocupla tipo J.

## RECOMENDACIONES

- Se recomienda implementar, en un futuro, un sistema de enfriamiento del agua del tanque de abastecimiento del módulo, para de esa manera poder utilizar el sistema de suelo radiante en modo refrigeración. Esto debido a que los sistemas de climatización por superficies radiantes son versátiles, pudiendo funcionar en modo calefacción en invierno y en modo refrigeración en verano (Fegeca & Fenercom, 2017; Uponor, 2013).
- Si bien las pruebas experimentales realizadas sobre el módulo en la presente tesis están enfocadas en demostrar el principio de funcionamiento de una superficie radiante, enfocándose principalmente en la inercia térmica característica de dichos sistemas; es posible utilizar el mismo módulo para evaluar la mejora en el rendimiento del presente sistema de calefacción utilizando otros fluidos base con características térmicas mejoradas, o utilizando materiales que recubran a la tubería de cobre para mejorar la transmisión de calor.
- Se sugiere controlar y monitorear la humedad absoluta y relativa en el ambiente interior del recinto del módulo, ya que en un sistema real de climatización por suelo radiante está estrictamente ligado con el control de este parámetro, puesto que se debe garantizar que no se llegue al punto de rocío al interior del recinto para evitar condensaciones en la superficie radiante, sobre todo si se utiliza el sistema en modo refrigeración, y por ende, se estará limitado en cuanto a cuan bajo puede estar la temperatura de la superficie radiante.
- Se sugiere integrar al módulo, en trabajos futuros, un sistema de apoyo a la calefacción del agua de abastecimiento mediante energías renovables, por ejemplo, mediante paneles solares. Esto debido a que el uso de energías renovables está estrictamente ligado a los sistemas de climatización por suelo radiante.

- Como se mencionó en la realización de pruebas experimentales, la temperatura exterior a la cámara de pruebas y la temperatura de la superficie de arena compartirán el mismo sensor de temperatura, ya que se asume que la temperatura exterior no variará significativamente siendo necesario registrar su valor una vez. Sin embargo, se recomienda implementar otro sensor de temperatura adicional para medir ambas temperaturas por separado.
- Debido a que la interfaz de usuario implementada en Labview, que se comunica con el microcontrolador, solo monitorea la temperatura interior, de la superficie de arena, y del agua del tanque, se sugiere mejorar dicha interfaz para que también pueda monitorear los demás parámetros monitoreados manualmente en el módulo.
- Se recomienda incorporar, en trabajos futuros, más sensores de temperatura que monitoreen la temperatura de la superficie de arena de la cámara de pruebas, para evaluar la uniformidad y/o variaciones de temperatura en el suelo, dependiendo de la distribución de la tubería de agua caliente en el suelo.
- Cuando se utilice el sistema electrónico del módulo, se recomienda enchufar dicho sistema en un tomacorriente aparte del que se enchufe la alimentación general del módulo, ya que se observó que al enchufar todo en un solo tomacorrientes, al requerir mucha potencia, se observó una caída de voltaje (hasta 190 V), lo que implicaba un mal funcionamiento tanto de los termostatos XMTG-2301-J (conmutación inesperada de su relé interno), como del sistema electrónico (lecturas erróneas del sistema de medición de temperatura, así como un control poco estable del voltaje de las resistencias calefactoras mediante el ángulo de disparo), ya que ambos están diseñados para trabajar con 220 V. Todo esto se solucionó al conectar el sistema electrónico y la alimentación general del módulo en dos tomacorrientes distintos.

## REFERENCIAS

- ALB Sistemas S.A. (2017). *Sistema de climatización radiante. Manual Técnico.*
- Atmel Corporation. (2012). *Atmel-42735-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega328-328P\_Datasheet.*
- Berrio Huarahuara, W. R., & Hanco Mamani, F. (2017). *Diseño de un prototipo de calefacción por m<sup>2</sup> de superficie de piso radiante utilizando PCMS aprovechando la energía solar térmica en la ciudad de Puno.*  
[http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/2816/Luna\\_Mamani\\_Elizabeth.pdf?sequence=1](http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/2816/Luna_Mamani_Elizabeth.pdf?sequence=1)
- CEDIC. (2009). *Manual de tubo y accesorios de cobre.* 173.
- CTE. (2007). DB-HS Salubridad. *Septiembre, 2013*, 1–129. <http://www.arquitectura-tecnica.com/hit/Hit2016-2/DBHE.pdf>
- CTE. (2015). *DA DB-HE-1 Ahorro Energético (Cálculo de parámetros característicos de la envolvente).* 1–19.
- Díaz, J., & Tinta, F. (2017). *Diseño y Construcción de un Módulo Experimental de Suelo Radiante a Energía Solar.*  
[http://repositorio.ucss.edu.pe/bitstream/handle/UCSS/85/González\\_Carlos\\_tesis\\_bachiller\\_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.ucss.edu.pe/bitstream/handle/UCSS/85/González_Carlos_tesis_bachiller_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Fegeca, & Fenercom. (2017). *Guía de suelo radiante.*  
<https://www.fenercom.com/pages/publicaciones/publicacion.php?id=243>
- Ghajar, A. J., & Cengel., Y. A. (2011). *Heat and Mass Transfer: Fundamentals & Applications.*
- IDAE. (2008). *Guía Técnica de Instalaciones de Climatización por Agua.*
- Marrero Marín, J. (2009). *Calefacción Mediante Suelo Radiante.*

National Aeronautics and Space Association. (2010). Measurement Uncertainty Analysis

Principles and Methods. *NASA Measurement Quality Assurance Handbook*, July.

Ogata, K. (1996). *Sistemas de Control en Tiempo Discreto* (Vol. 66).

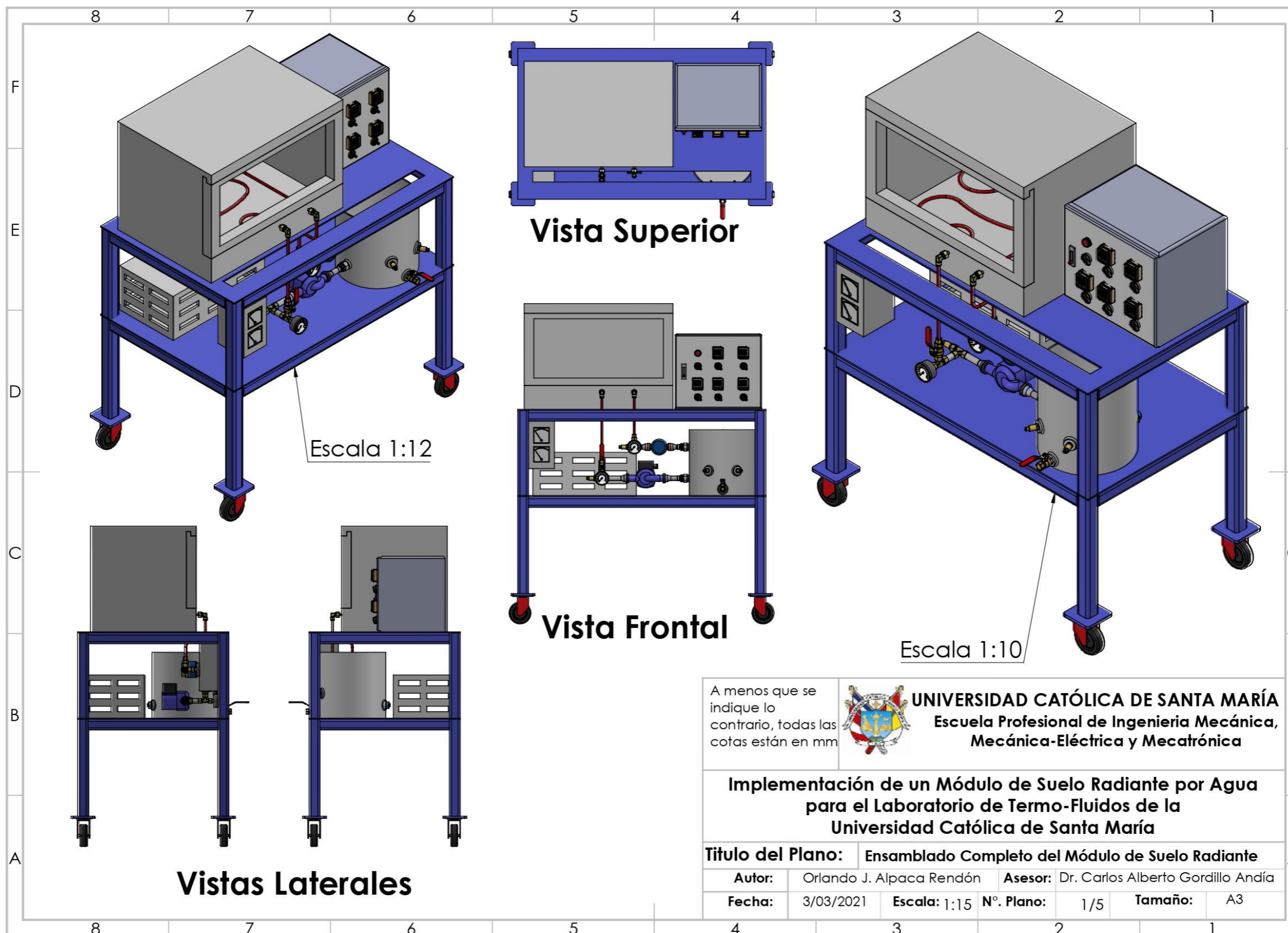
REHAU. (2019). *Sistemas de calefacción y refrescamiento por superficies radiantes*.

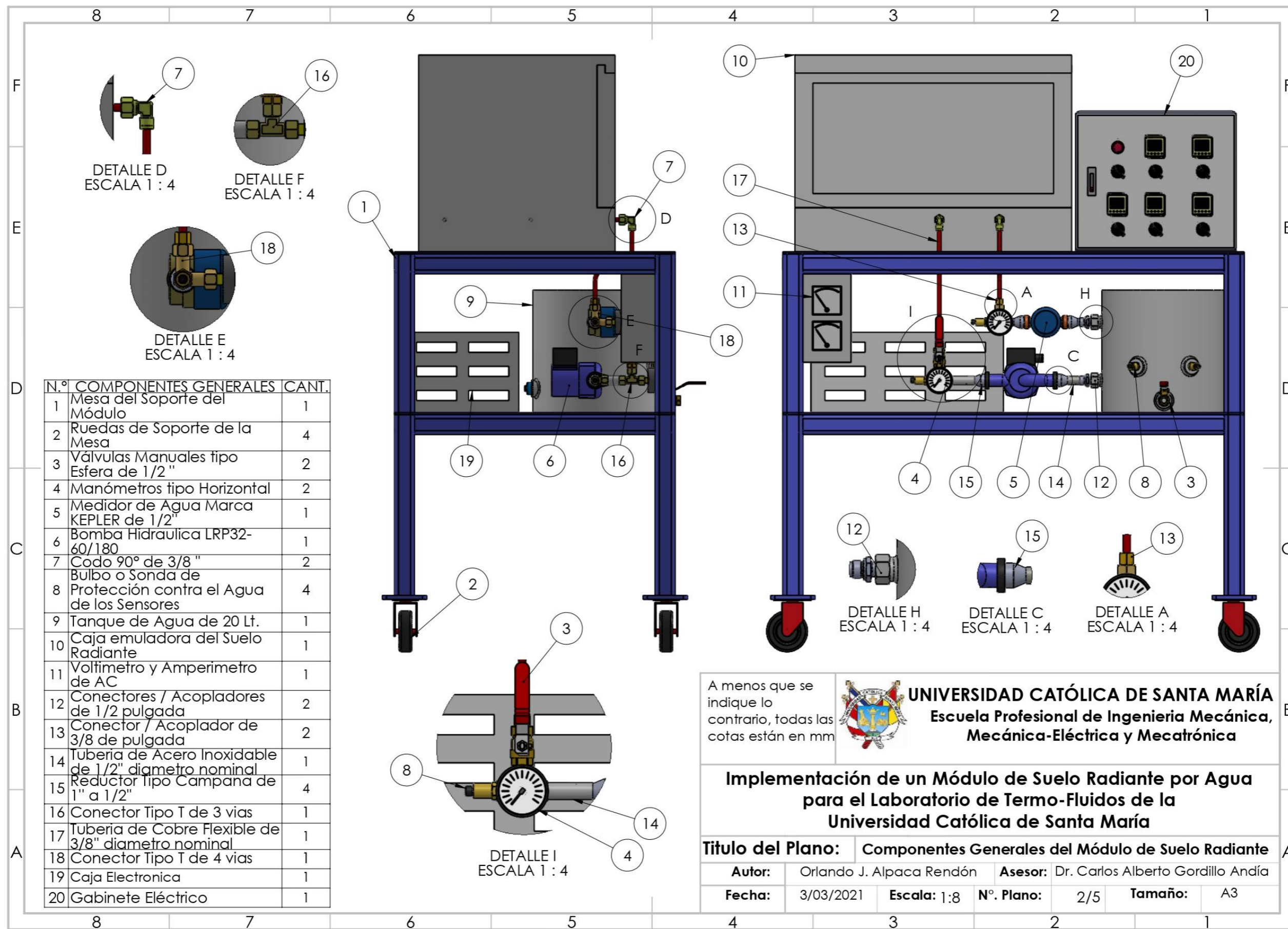
Uponor. (2013). *Manual técnico de Climatización Invisible*.



ANEXOS

ANEXO A: PLANOS MECÁNICOS DEL MÓDULO DE SUELO RADIANTE





N.º	COMPONENTES GENERALES	CANT.
1	Mesa del Soporte del Módulo	1
2	Ruedas de Soporte de la Mesa	4
3	Válvulas Manuales tipo Esfera de 1/2"	2
4	Manómetros tipo Horizontal	2
5	Medidor de Agua Marca KEPLER de 1/2"	1
6	Bomba Hidraulica LRP32-60/180	1
7	Codo 90° de 3/8"	2
8	Bulbo o Sonda de Protección contra el Agua de los Sensores	4
9	Tanque de Agua de 20 Lt.	1
10	Caja emuladora del Suelo Radiante	1
11	Voltímetro y Amperímetro de AC	1
12	Conectores / Acopladores de 1/2 pulgada	2
13	Conector / Acoplador de 3/8 de pulgada	2
14	Tubería de Acero Inoxidable de 1/2" diametro nominal	1
15	Reductor tipo Campana de 1" a 1/2"	4
16	Conector Tipo T de 3 vias	1
17	Tubería de Cobre Flexible de 3/8" diametro nominal	1
18	Conector Tipo T de 4 vias	1
19	Caja Electronica	1
20	Gabinete Eléctrico	1

A menos que se indique lo contrario, todas las cotas están en mm

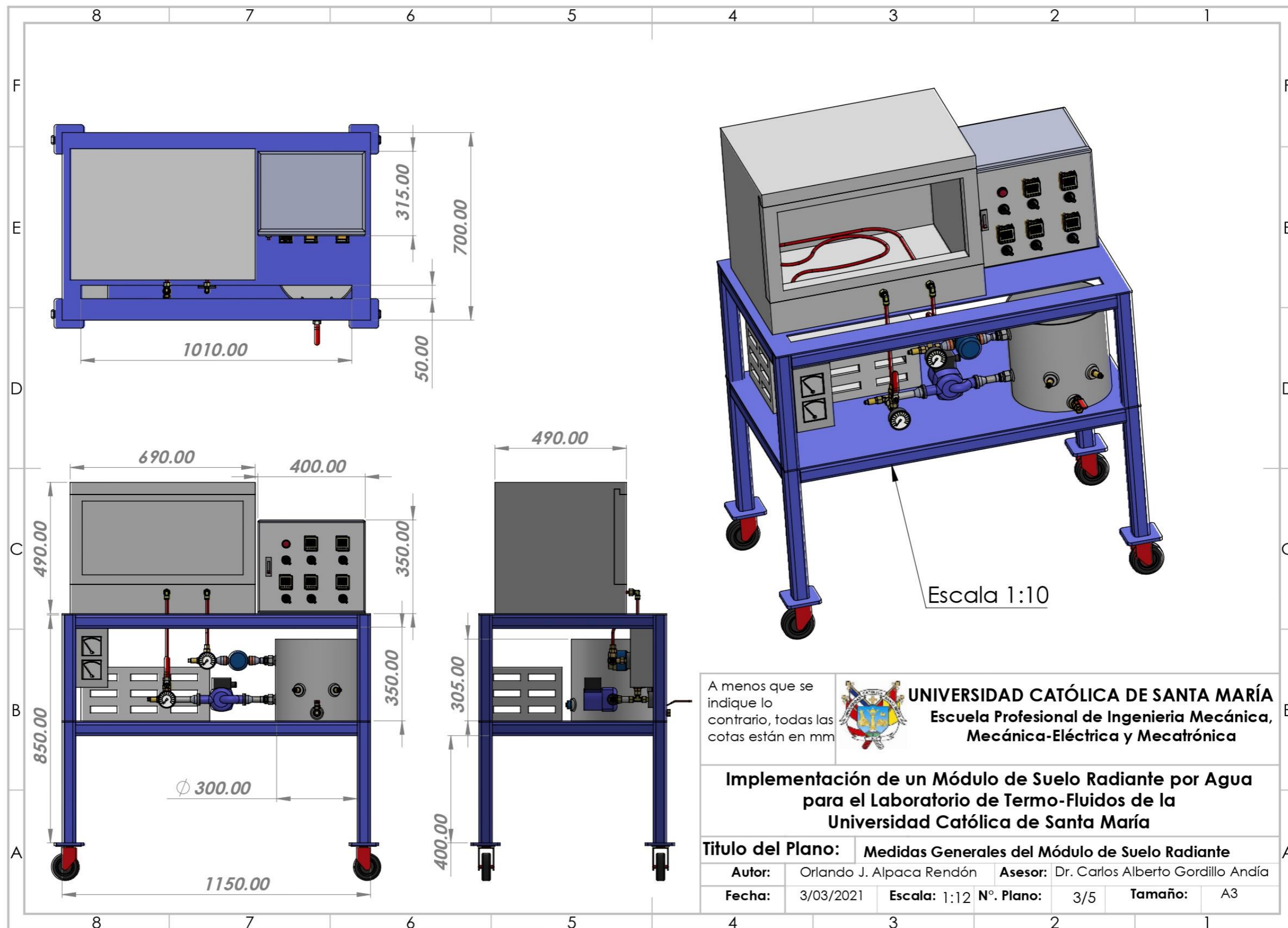


**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA**  
**Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Mecánica-Eléctrica y Mecatrónica**

**Implementación de un Módulo de Suelo Radiante por Agua para el Laboratorio de Termo-Fluidos de la Universidad Católica de Santa María**

**Título del Plano:** Componentes Generales del Módulo de Suelo Radiante

<b>Autor:</b>	Orlando J. Alpaca Rendón	<b>Asesor:</b>	Dr. Carlos Alberto Gordillo Andía
<b>Fecha:</b>	3/03/2021	<b>Escala:</b>	1:8
		<b>Nº. Plano:</b>	2/5
		<b>Tamaño:</b>	A3



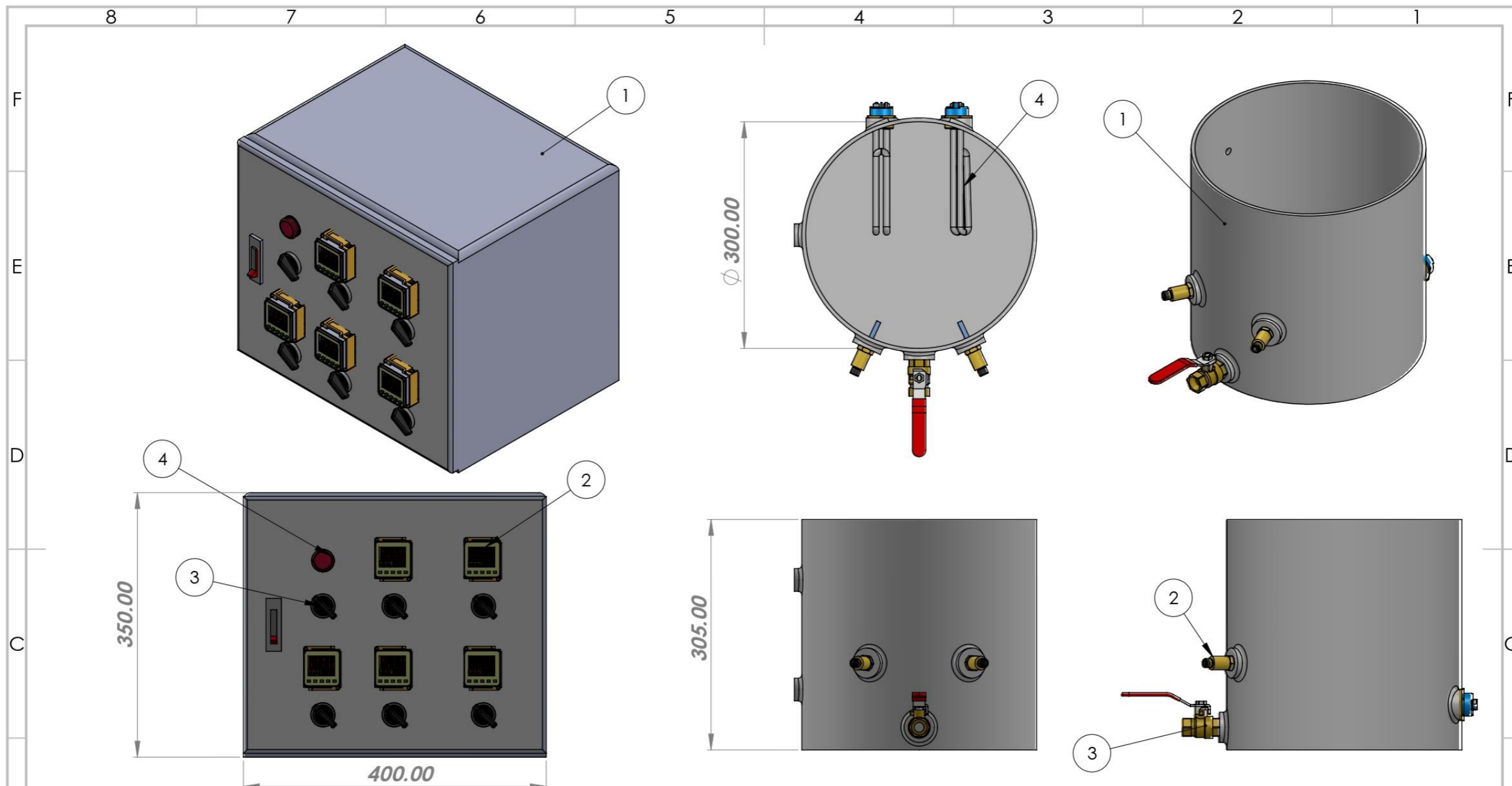
A menos que se indique lo contrario, todas las cotas están en mm



**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA**  
 Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica,  
 Mecánica-Eléctrica y Mecatrónica

**Implementación de un Módulo de Suelo Radiante por Agua para el Laboratorio de Termo-Fluidos de la Universidad Católica de Santa María**

<b>Título del Plano:</b>	Medidas Generales del Módulo de Suelo Radiante				
<b>Autor:</b>	Orlando J. Alpaca Rendón	<b>Asesor:</b>	Dr. Carlos Alberto Gordillo Andía		
<b>Fecha:</b>	3/03/2021	<b>Escala:</b>	1:12	<b>Nº. Plano:</b>	3/5
		<b>Tamaño:</b>	A3		



N.º	Componentes Gabinete Eléctrico	CANT.
1	Gabinete Electrico	1
2	Controlador de Temperatura XMTG-2301-J	5
3	Selector / Switch de 2 posiciones	6
4	Luz Roja Indicadora de Encendido General	1

N.º	Componentes Tanque de Agua	CANT.
1	Tanque Agua	1
2	bulbo o Sonda para proteccion contra el agua de los sensores de temperatura	2
3	Válvula Manual tipo Esfera	1
4	Resistencia Calefactora Sumergible de 1.5 kW de una Terma Eléctrica	2

A menos que se indique lo contrario, todas las cotas están en mm



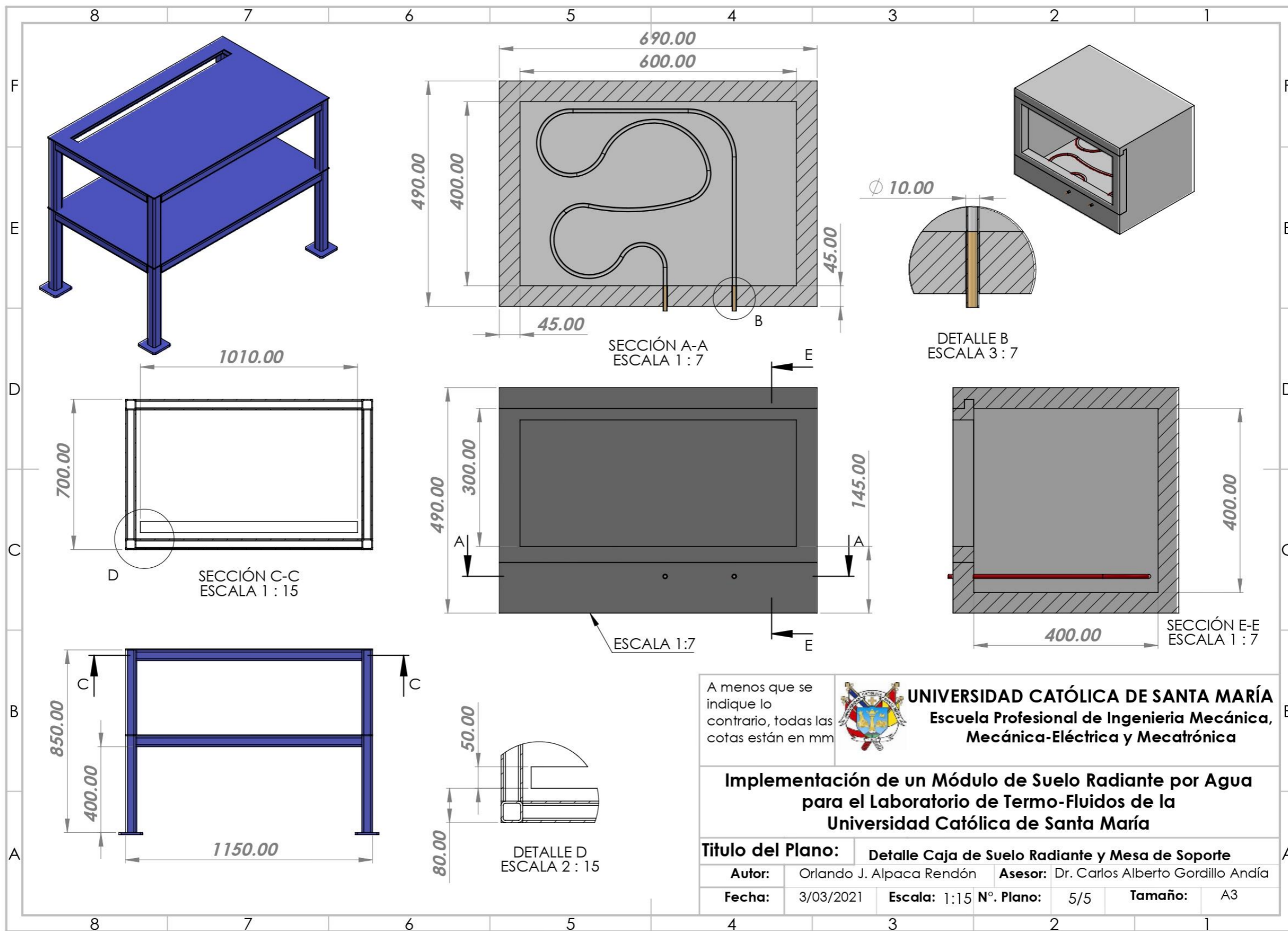
**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA**  
**Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Mecánica-Eléctrica y Mecatrónica**

**Implementación de un Módulo de Suelo Radiante por Agua para el Laboratorio de Termo-Fluidos de la Universidad Católica de Santa María**

**Título del Plano:** Detalle del Gabinete Eléctrico y el Tanque de Agua

**Autor:** Orlando J. Alpaca Rendón    **Asesor:** Dr. Carlos Alberto Gordillo Andía

**Fecha:** 3/03/2021    **Escala:** 1:5    **Nº. Plano:** 4/5    **Tamaño:** A3



A menos que se indique lo contrario, todas las cotas están en mm

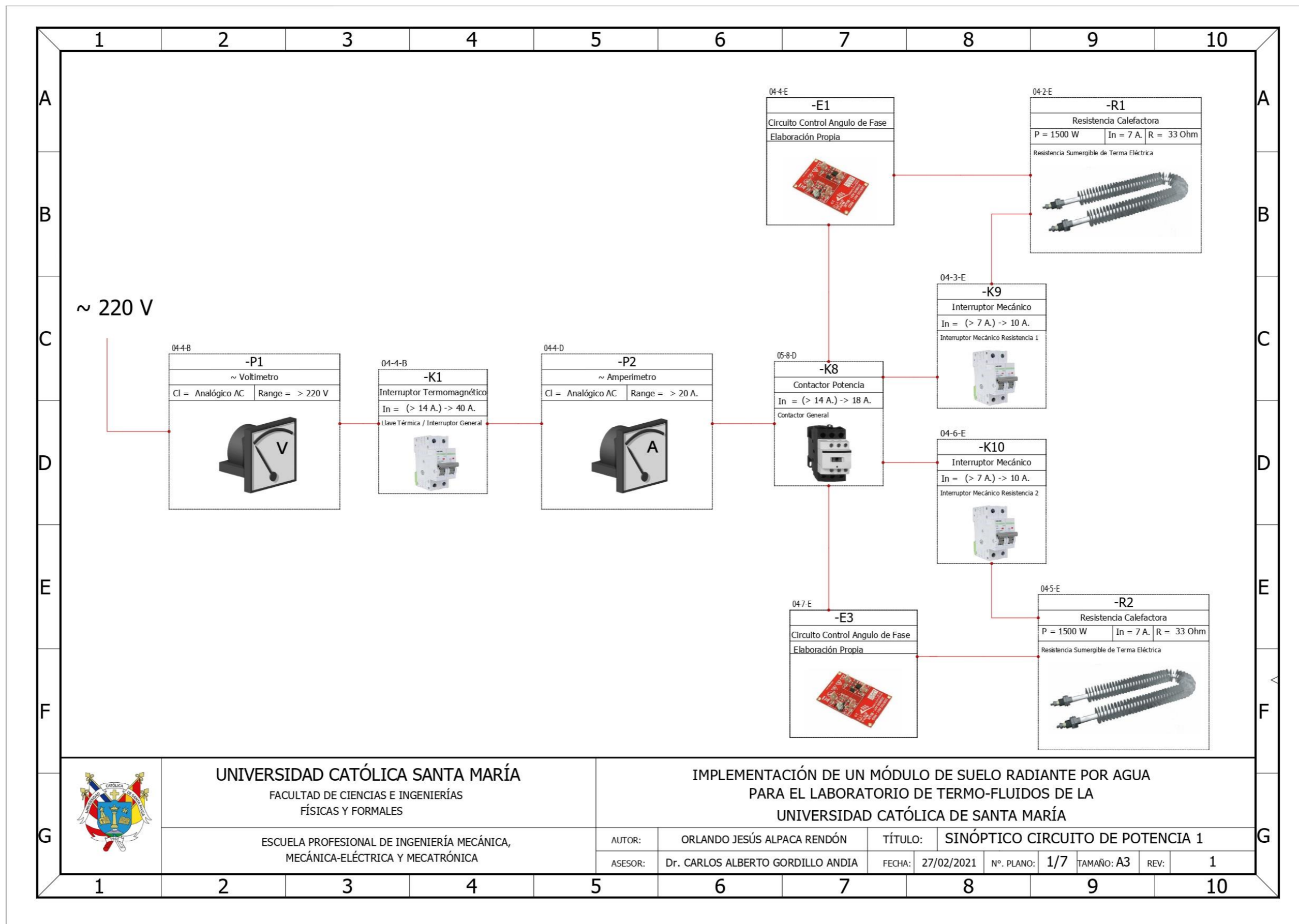


**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA**  
 Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica,  
 Mecánica-Eléctrica y Mecatrónica

**Implementación de un Módulo de Suelo Radiante por Agua para el Laboratorio de Termo-Fluidos de la Universidad Católica de Santa María**

<b>Título del Plano:</b> Detalle Caja de Suelo Radiante y Mesa de Soporte	
<b>Autor:</b> Orlando J. Alpaca Rendón	<b>Asesor:</b> Dr. Carlos Alberto Gordillo Andía
<b>Fecha:</b> 3/03/2021	<b>Escala:</b> 1:15 <b>Nº. Plano:</b> 5/5 <b>Tamaño:</b> A3

ANEXO B: PLANOS DEL SISTEMA ELÉCTRICO DEL MÓDULO

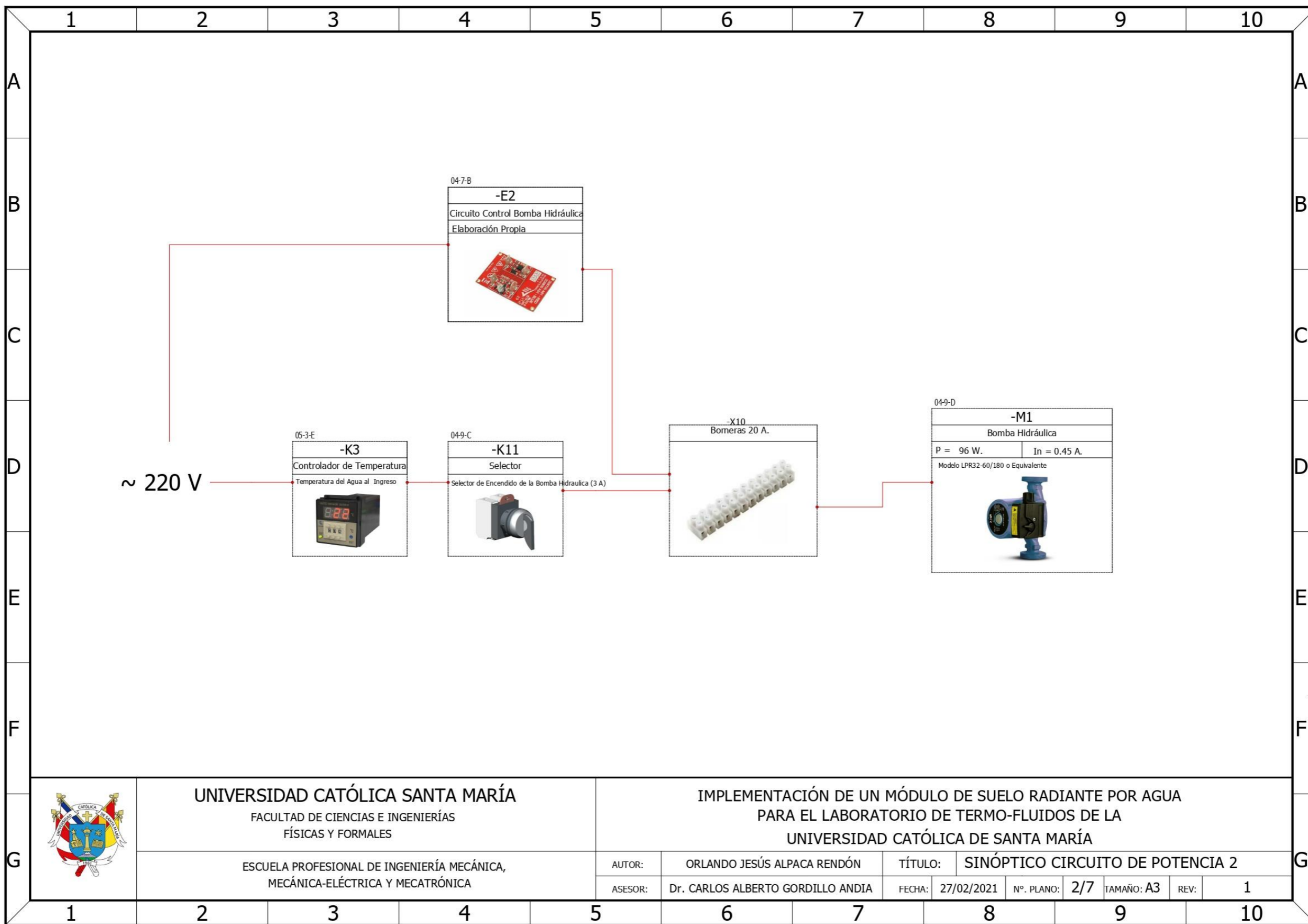


UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTA MARÍA  
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍAS  
FÍSICAS Y FORMALES

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA,  
MECÁNICA-ELÉCTRICA Y MECATRÓNICA

IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DE SUELO RADIANTE POR AGUA  
PARA EL LABORATORIO DE TERMO-FLUIDOS DE LA  
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

AUTOR:	ORLANDO JESÚS ALPACA RENDÓN	TÍTULO:	SINÓPTICO CIRCUITO DE POTENCIA 1		
ASESOR:	Dr. CARLOS ALBERTO GORDILLO ANDÍA	FECHA:	27/02/2021	Nº. PLANO:	1/7
		TAMAÑO:	A3	REV:	1

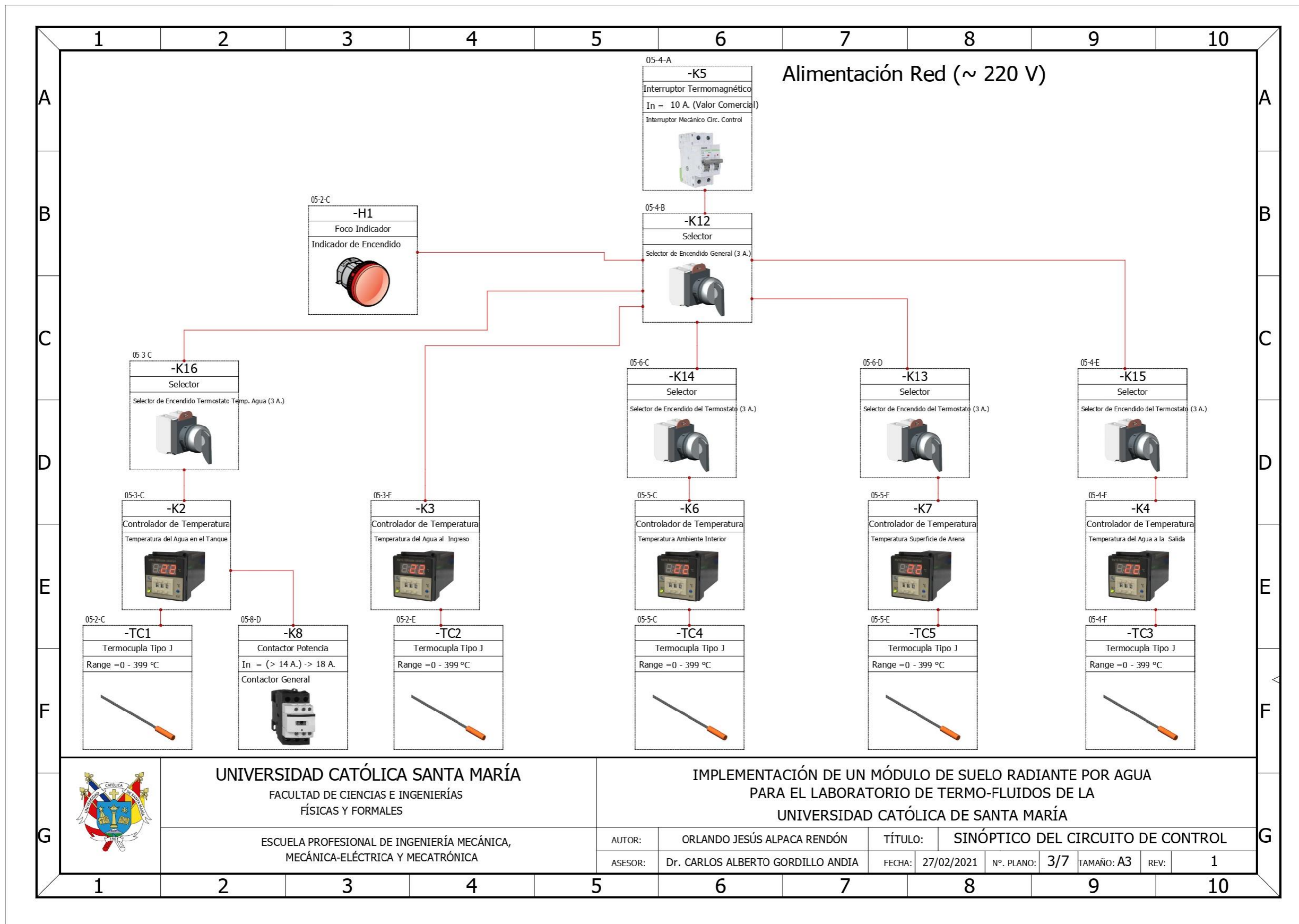


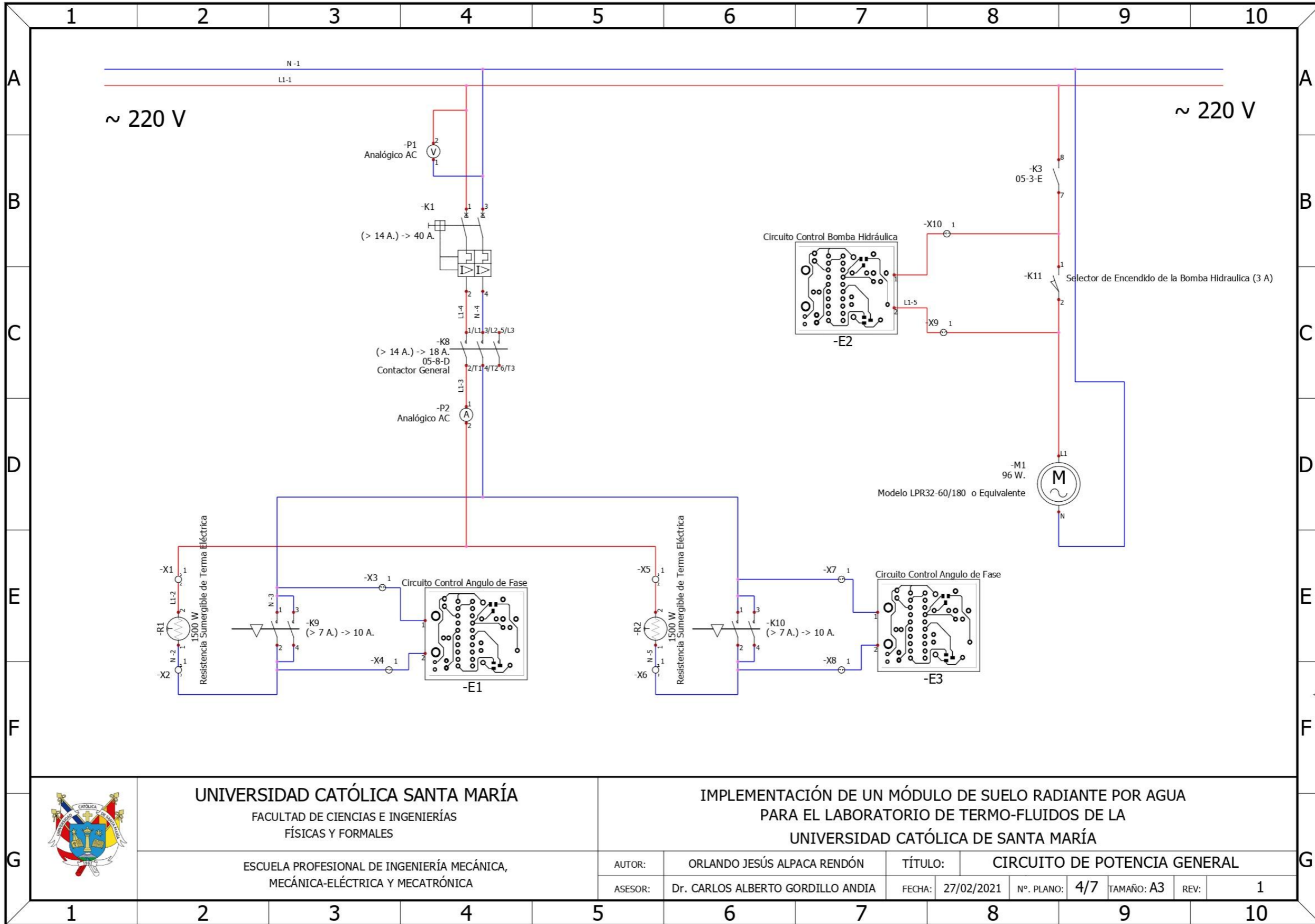
UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTA MARÍA  
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍAS  
FÍSICAS Y FORMALES

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA,  
MECÁNICA-ELÉCTRICA Y MECATRÓNICA

IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DE SUELO RADIANTE POR AGUA  
PARA EL LABORATORIO DE TERMO-FLUIDOS DE LA  
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

AUTOR:	ORLANDO JESÚS ALPACA RENDÓN	TÍTULO:	SINÓPTICO CIRCUITO DE POTENCIA 2						
ASESOR:	Dr. CARLOS ALBERTO GORDILLO ANDÍA	FECHA:	27/02/2021	Nº. PLANO:	2/7	TAMAÑO:	A3	REV:	1





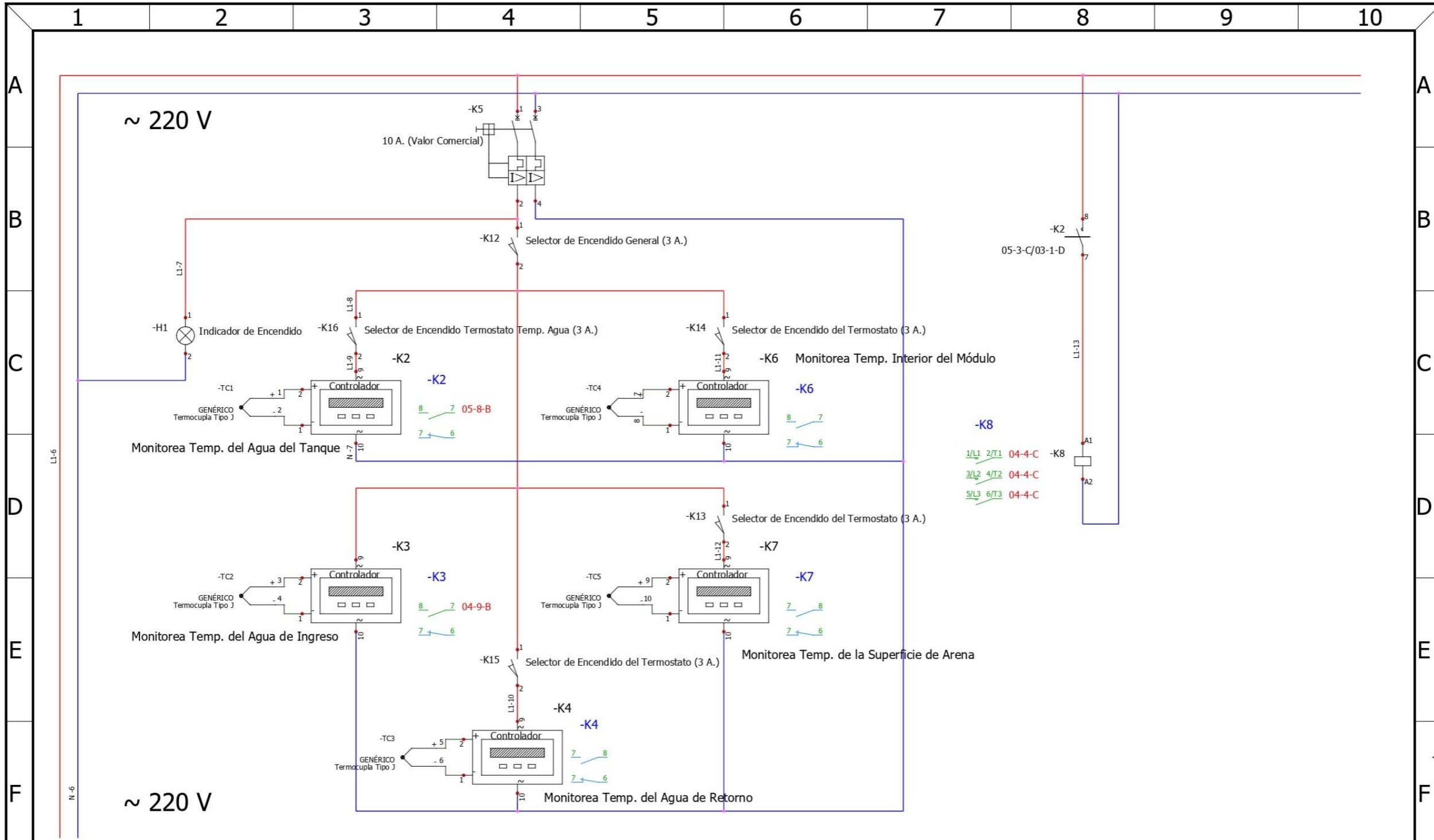
**UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTA MARÍA**  
 FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍAS  
 FÍSICAS Y FORMALES

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA,  
 MECÁNICA-ELÉCTRICA Y MECATRÓNICA

**IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DE SUELO RADIANTE POR AGUA  
 PARA EL LABORATORIO DE TERMO-FLUIDOS DE LA  
 UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA**

AUTOR:	ORLANDO JESÚS ALPACA RENDÓN	TÍTULO:	CIRCUITO DE POTENCIA GENERAL						
ASESOR:	Dr. CARLOS ALBERTO GORDILLO ANDÍA	FECHA:	27/02/2021	Nº. PLANO:	4/7	TAMAÑO:	A3	REV:	1

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10



UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTA MARÍA  
 FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍAS  
 FÍSICAS Y FORMALES

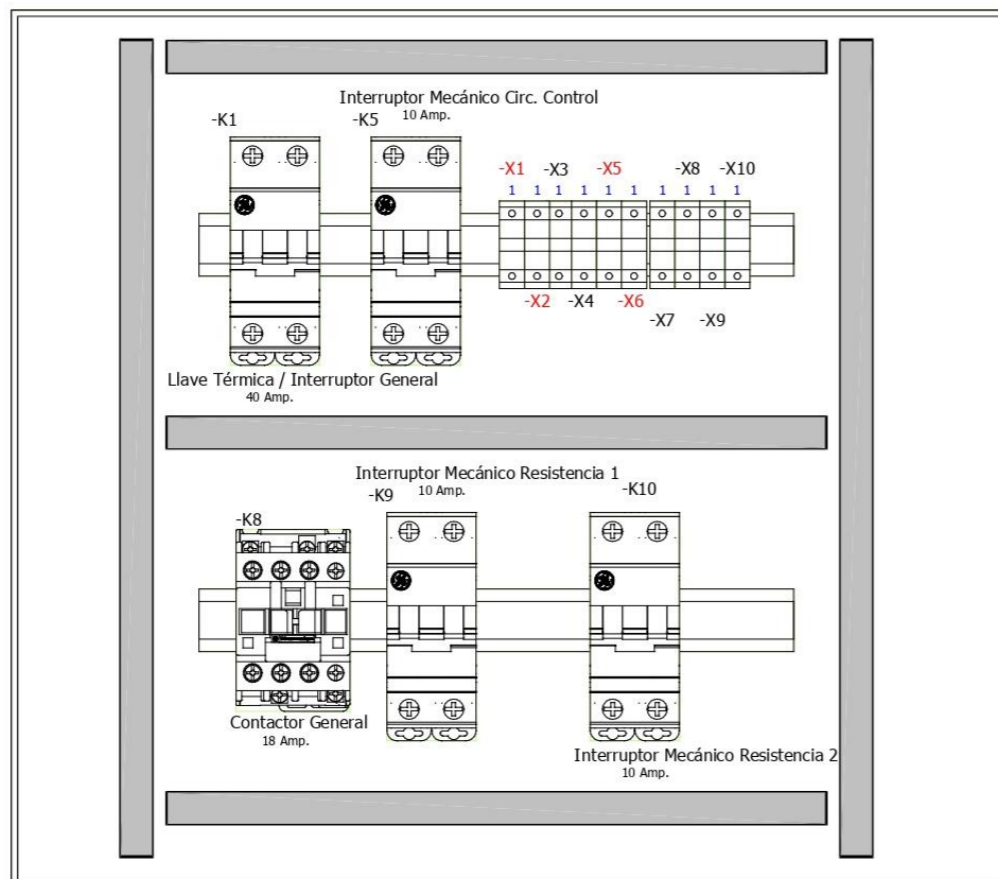
IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DE SUELO RADIANTE POR AGUA  
 PARA EL LABORATORIO DE TERMO-FLUIDOS DE LA  
 UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA,  
 MECÁNICA-ELÉCTRICA Y MECATRÓNICA

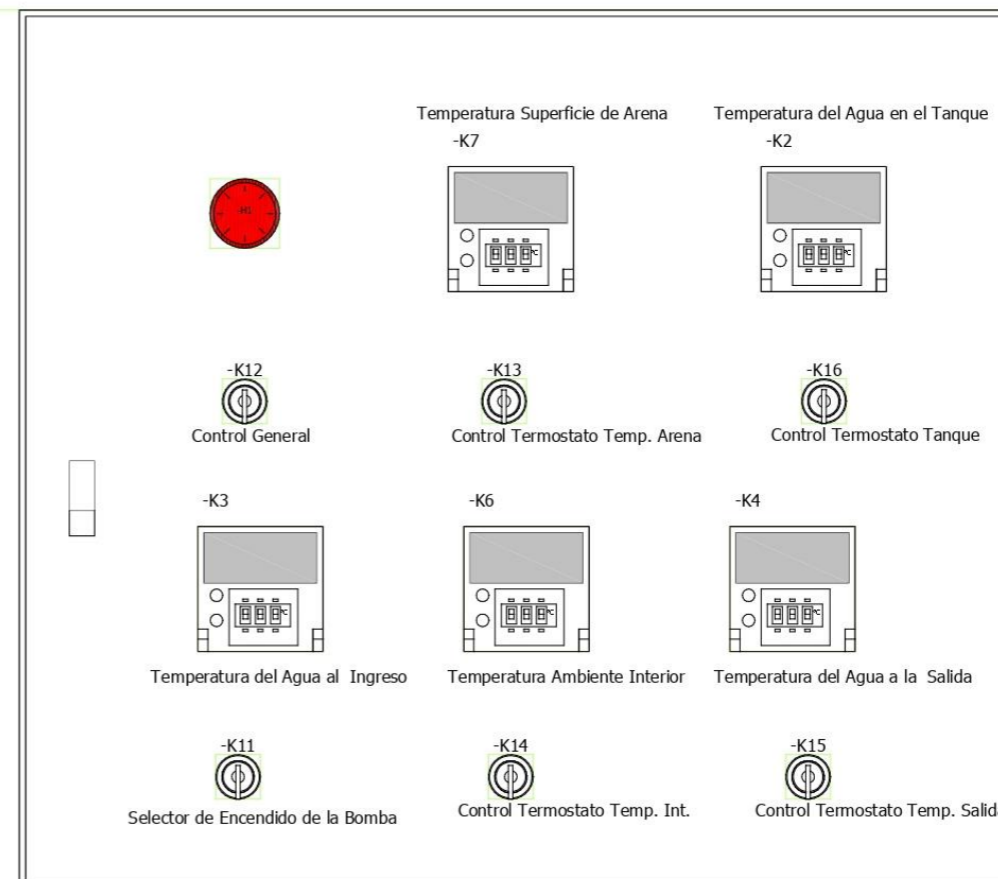
AUTOR:	ORLANDO JESÚS ALPACA RENDÓN	TÍTULO:	CIRCUITO DE CONTROL						
ASESOR:	Dr. CARLOS ALBERTO GORDILLO ANDÍA	FECHA:	27/02/2021	Nº. PLANO:	5/7	TAMAÑO:	A3	REV:	1

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

### INTERIOR



### EXTERIOR



UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTA MARÍA

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍAS  
FÍSICAS Y FORMALES

ESCUELA PROFESIONA DE INGENIERÍA MECÁNICA,  
MECÁNICA-ELÉCTRICA Y MECATRÓNICA

IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DE SUELO RADIANTE POR AGUA  
PARA EL LABORATORIO DE TERMO-FLUIDOS DE LA  
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

AUTOR:	ORLANDO JESÚS ALPACA RENDÓN	TÍTULO:	DISTRIBUCIÓN GABINETE ELÉCTRICO						
ASESOR:	Dr. CARLOS ALBERTO GORDILLO ANDÍA	FECHA:	27/02/2021	Nº. PLANO:	6/7	TAMAÑO:	A3	REV:	1

**Elaboración Propia**

Referencia	Etiqueta	Descripción	Cantidad
Circuito Control Angulo de Fase	-E1 , -E3	Placas PCB diseñadas en la presente tesis para controlar el voltaje eficaz a través de las resistencias calefactoras. Van conectadas en Paralelo con los interruptore mecánicos de cada resistencia	2
Circuito Control Bomba Hidráulica	-E2	Placa PCB diseñada en la presente tesis. Va conectada en paralelo con el relé del controlador XMTG-2301-J que monitorea la temperatura del agua de impulsión	1

**GENÉRICO**


Referencia	Etiqueta	Descripción	Cantidad
~ Amperimetro	-P2	Amperimetro analógico que monitorea la corriente total consumida por ambas resistencias calefactoras	1
~ Voltimetro	-P1	Voltimetro analógico que monitorea el voltaje de alimentación general del módulo	1
Bomba Hidráulica	-M1	La Bomba seleccionada es del fabricante Humbolt Pumps, modelo LPR32-60/180	1
Bomera	-X4-1 , -X7-1 , -X8-1 , -X10-1 , -X9-1 , -X3-1 , -X1-1 , -X2-1 , -X5-1 , -X6-1	Tira de Borneras.	10
Contactor Potencia	-K8	Contactor de potencia de 18 A.y 220 V.Controla el encendido de ambas resistencias calefactoras. Su bobina es controlada por el XMTG-2301-J que monitorea la temperatura del agua	1
Controlador de Temperatura	-K2 , -K3 , -K4 , -K6 , -K7	Se utilizó el modelo chino XMTG-2301-J, el cual es un Controlador de Temperatura por Relé con una capacidad máxima de 7 Amp.	5
Foco Indicador	-H1	Indicador de color rojo para el encendido general de los controladores XMTG-3201-J	1
Interruptor Mecánico	-K9 , -K10	Se utilizaron interruptores termomagnéticos (10 Amp. y 415 V) como interruptores mecanicos en la construccion del módulo ya que se disponian de multiples interruptores termomagnéticos	2
Interruptor Termomagnético	-K1 , -K5	Se utilizó un interruptor termomagnético (uno de 10 Amp. y otro de 40 Amp.) usados como interruptor mecánico general ademas de protección contra sobrecorrientes	2
Resistencia Calefactora	-R1 , -R2	Se utilizaron dos resistencias calefactoras sumergibles de una terma eléctrica de 1500 W cada una	2
Selector	-K11 , -K12 , -K13 , -K14 , -K15 , -K16	Consta de dos partes, un bloque de contacto modelo ZB2-BE101C (3 Amp) y el switch de dos posiciones XB2-BD21	6
Termocupla Tipo J	-TC1 , -TC2 , -TC3 , -TC4 , -TC5	Se utilizaron termocuplas tipo J debido a que los controladores XMTG-2301 trabajan con este tipo en especifico, ademas que este tipo de termocupla es para bajas temperaturas	5

**PROPIO**

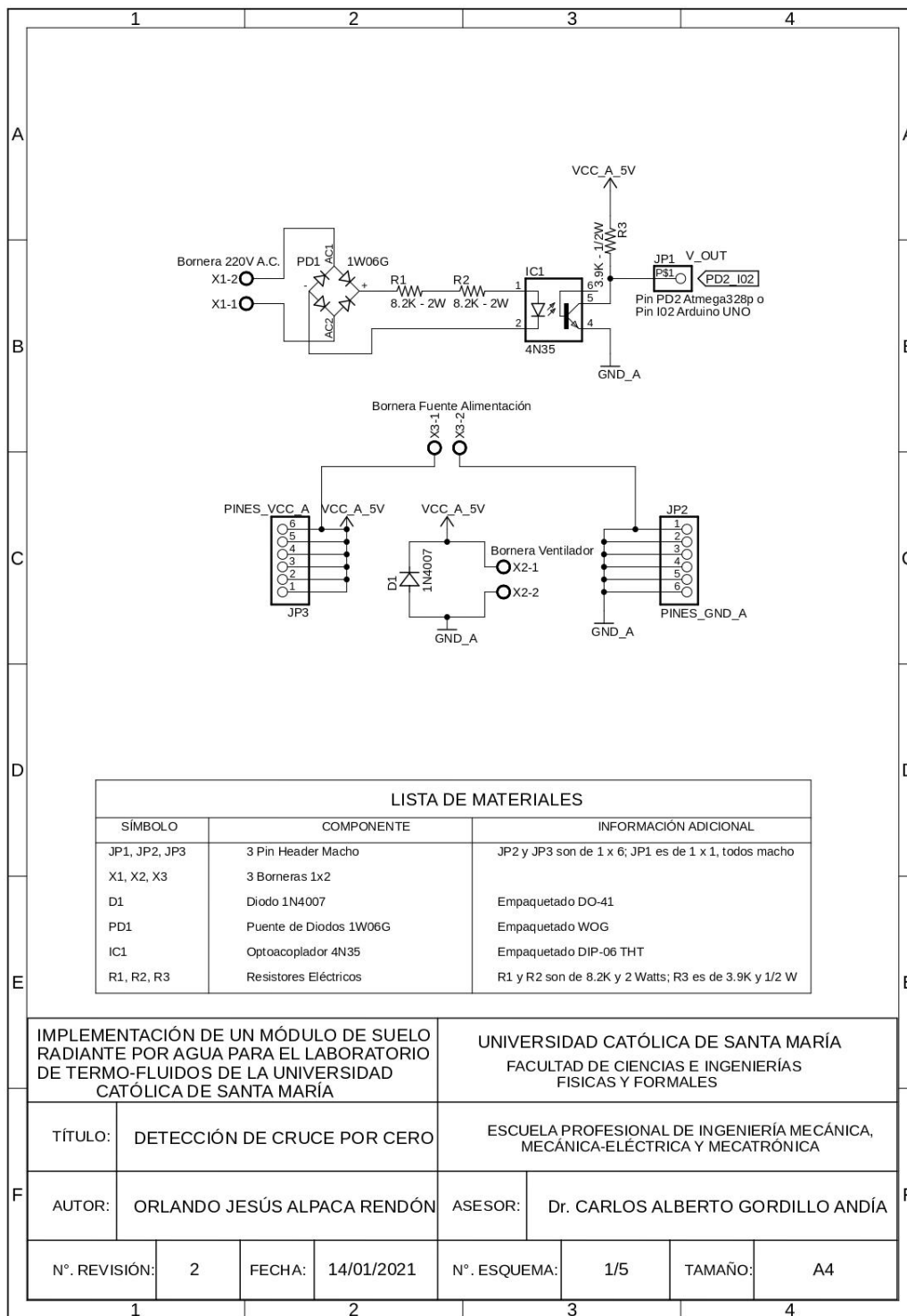
Referencia	Etiqueta	Descripción	Cantidad
ARMARIO	+L1	El armario que contiene a los componentes electricos en la presente lista tiene unas dimensiones interiores de 40 cm x 35 cm x 30 cm	1
CANALETA	+L1		5
RIEL	+L1		2

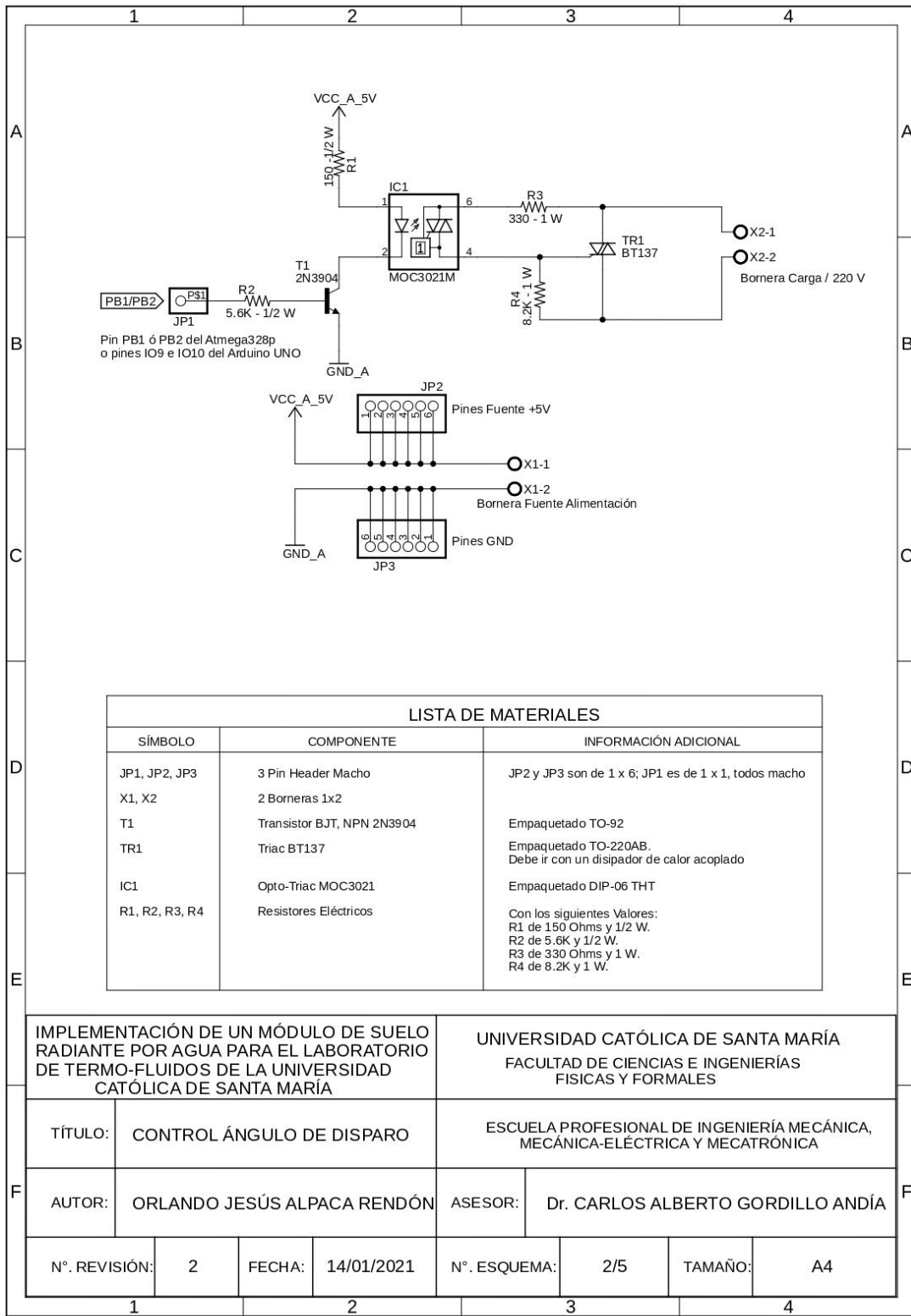
**CABLES**

Circuito de Potencia		Circuito de Control	
Referencia	Sección del Cable (AWG)	Referencia	Sección del Cable (AWG)
Circuito de Potencia para las Resistencias	Calibre 12 AWG (< 20 Amp)	Circuito de Control General	Calibre 16 AWG (< 10 Amp)
Circuito de Potencia para la Bomba	Calibre 16 AWG (< 10 Amp)		

	<b>UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTA MARÍA</b> FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍAS FÍSICAS Y FORMALES ESCUELA PROFESIONA DE INGENIERÍA MECÁNICA, MECÁNICA-ELÉCTRICA Y MECATRÓNICA		<b>IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DE SUELO RADIANTE</b>													
	AUTOR:	ORLANDO JESÚS ALPACA RENDÓN	TÍTULO:	LISTA DE COMPONENTES					FECHA:	27/02/2021	Nº. PLANO:	7/7	TAMAÑO:	A3	REV:	1
	ASESOR:	Dr. JUAN CARLOS VALDEZ LOAIZA	FECHA:	27/02/2021	Nº. PLANO:	7/7	TAMAÑO:	A3	REV:	1						

### ANEXO C: PLANOS DEL SISTEMA ELECTRÓNICO DEL MÓDULO

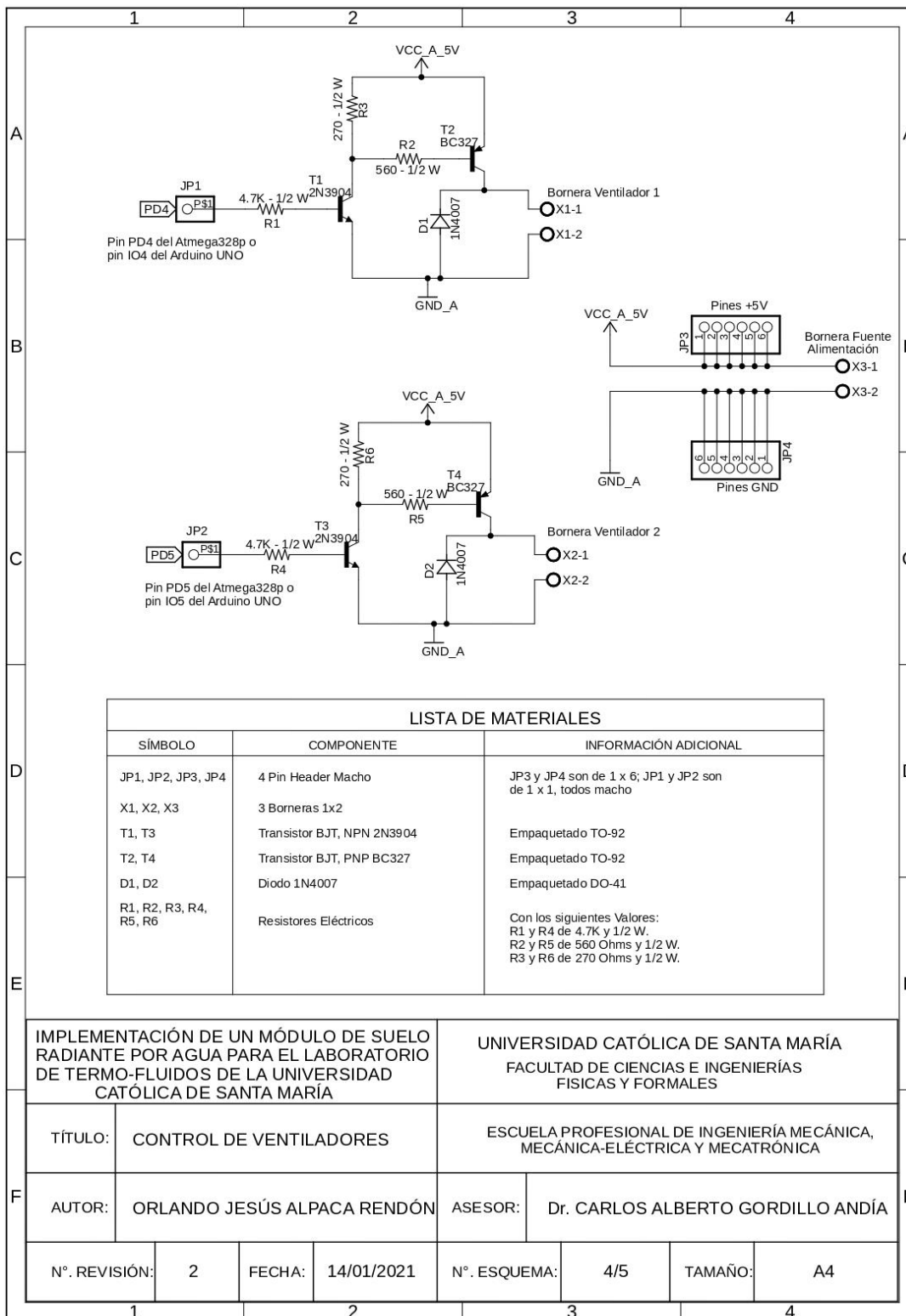


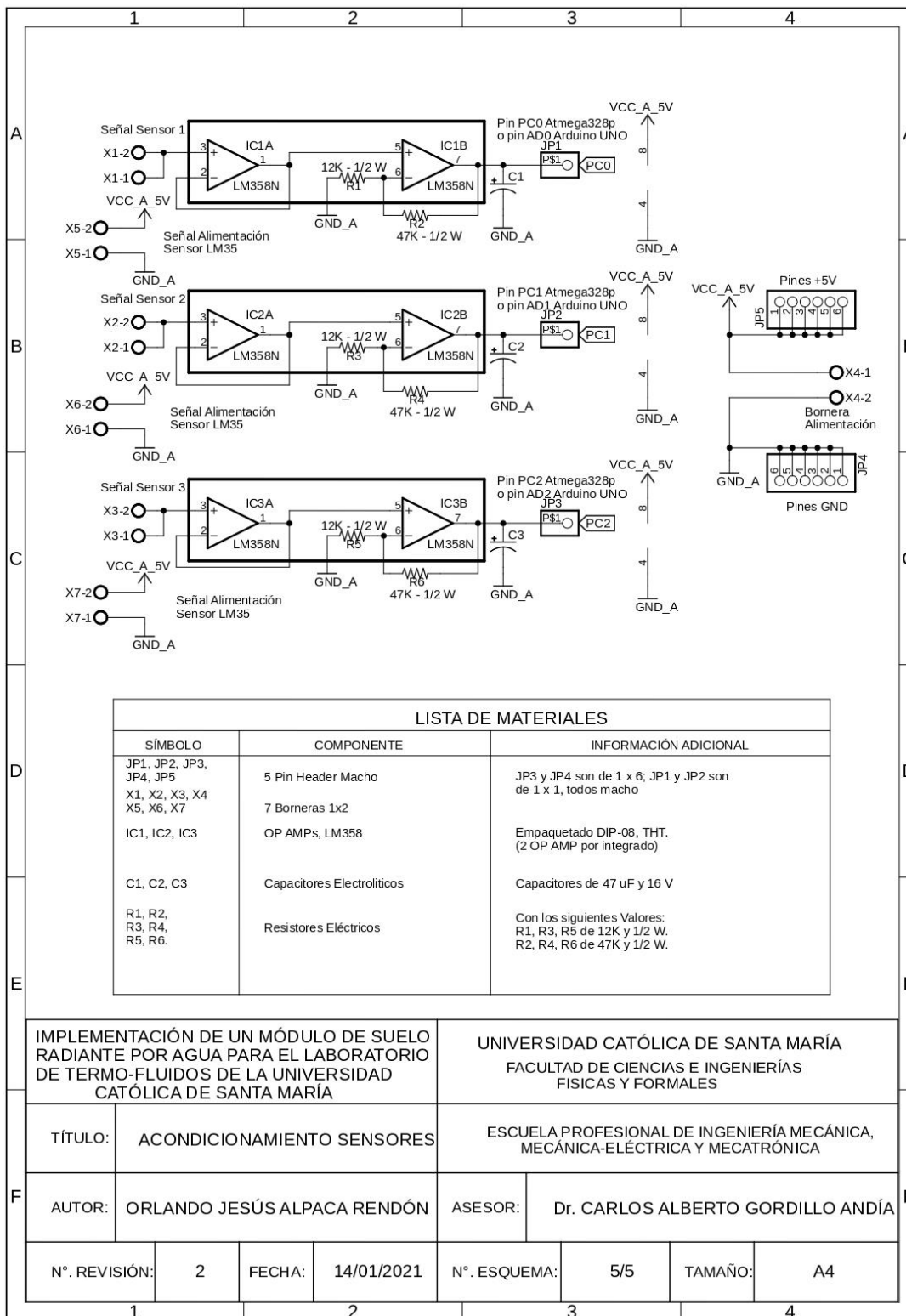


LISTA DE MATERIALES		
SÍMBOLO	COMPONENTE	INFORMACIÓN ADICIONAL
JP1, JP2, JP3	3 Pin Header Macho	JP2 y JP3 son de 1 x 6; JP1 es de 1 x 1, todos macho
X1, X2	2 Borneras 1x2	
T1	Transistor BJT, NPN 2N3904	Empaquetado TO-92
TR1	Triac BT137	Empaquetado TO-220AB. Debe ir con un disipador de calor acoplado
IC1	Opto-Triac MOC3021	Empaquetado DIP-06 THT
R1, R2, R3, R4	Resistores Eléctricos	Con los siguientes Valores: R1 de 150 Ohms y 1/2 W. R2 de 5.6K y 1/2 W. R3 de 330 Ohms y 1 W. R4 de 8.2K y 1 W.

IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DE SUELO RADIANTE POR AGUA PARA EL LABORATORIO DE TERMO-FLUIDOS DE LA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA		UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍAS FÍSICAS Y FORMALES	
TÍTULO:	CONTROL ÁNGULO DE DISPARO	ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA, MECÁNICA-ELECTRICA Y MECATRÓNICA	
AUTOR:	ORLANDO JESÚS ALPACA RENDÓN	ASESOR:	Dr. CARLOS ALBERTO GORDILLO ANDÍA
N°. REVISIÓN:	2	FECHA:	14/01/2021
N°. ESQUEMA:	2/5	TAMAÑO:	A4







LISTA DE MATERIALES		
SÍMBOLO	COMPONENTE	INFORMACIÓN ADICIONAL
JP1, JP2, JP3, JP4, JP5	5 Pin Header Macho	JP3 y JP4 son de 1 x 6; JP1 y JP2 son de 1 x 1, todos macho
X1, X2, X3, X4, X5, X6, X7	7 Borneras 1x2	
IC1, IC2, IC3	OP AMPS, LM358	Empaquetado DIP-08, THT. (2 OP AMP por integrado)
C1, C2, C3	Capacitores Electroliticos	Capacitores de 47 uF y 16 V
R1, R2, R3, R4, R5, R6.	Resistores Eléctricos	Con los siguientes Valores: R1, R3, R5 de 12K y 1/2 W. R2, R4, R6 de 47K y 1/2 W.

IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DE SUELO RADIANTE POR AGUA PARA EL LABORATORIO DE TERMO-FLUIDOS DE LA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA		UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍAS FÍSICAS Y FORMALES	
TÍTULO:	ACONDICIONAMIENTO SENSORES	ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA, MECÁNICA-ELECTRICA Y MECATRÓNICA	
AUTOR:	ORLANDO JESÚS ALPACA RENDÓN	ASESOR:	Dr. CARLOS ALBERTO GORDILLO ANDÍA
N°. REVISIÓN:	2	FECHA:	14/01/2021
N°. ESQUEMA:	5/5	TAMAÑO:	A4