



# **Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo**



**Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera**

***Maestría en Ciencias y Tecnología de la Madera***

**DESARROLLO Y PRUEBA DE CONTROLADOR ELECTRÓNICO PARA  
MONITOREAR Y CONTROLAR LA HUMEDAD Y TEMPERATURA DE UN  
HORNO DE SECADO**

Alumno: Ing. Gustavo Rojas Bravo

Mesa de sinodales

Director: Dr. Jose Cruz de Leon  
Co Director: M.C. Hector Manuel Sosa Villanueva

Vocales: Dr. Gildardo Cruz de León  
Dr. Jorge Enrique Ambriz Parra  
M. C. Antonio Ulises Saenz Trujillo



# Contenido

## Resumen

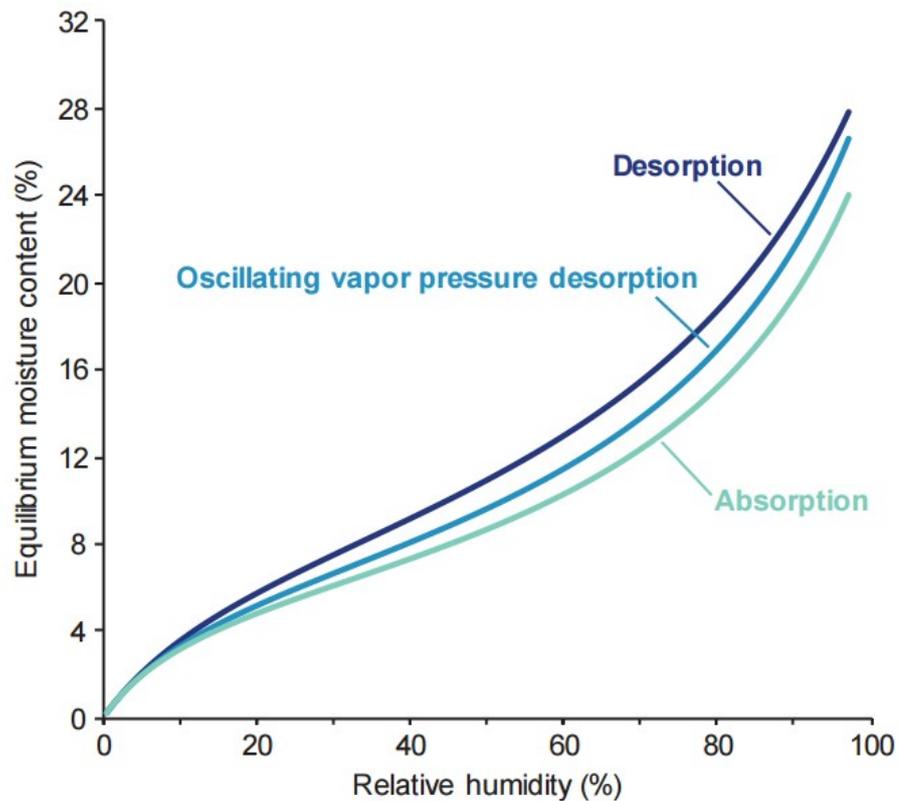
- 1.- Introducción.
- 2.- Antecedentes.
- 3.- Justificación.
- 4.- Objetivos.
- 5.- Hipótesis.
- 6.- Metodología.
- 7.- Discusión.
- 8.- Resultados.
- 9.- Anexos.
- 10.- Referencias Bibliográficas.



## 1.- Introducción

### MADERA

Toda la madera pierde o gana humedad en un intento de alcanzar un estado de equilibrio o equilibrio con las condiciones del aire circundante.



**Figure 4–2. Moisture content–relative humidity relationship for wood under absorption and various desorption conditions.**



## Cómo se seca la madera

El agua en la madera normalmente se mueve de mayor a menor zonas de contenido de humedad. El secado se puede dividir en dos fases: movimiento de agua desde el interior hasta la superficie de la madera, y eliminación de agua de la superficie.

March 2021

Forest Products Laboratory. 2021. Wood handbook—wood as an engineering material. General Technical Report FPL-GTR-282. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 543 p.

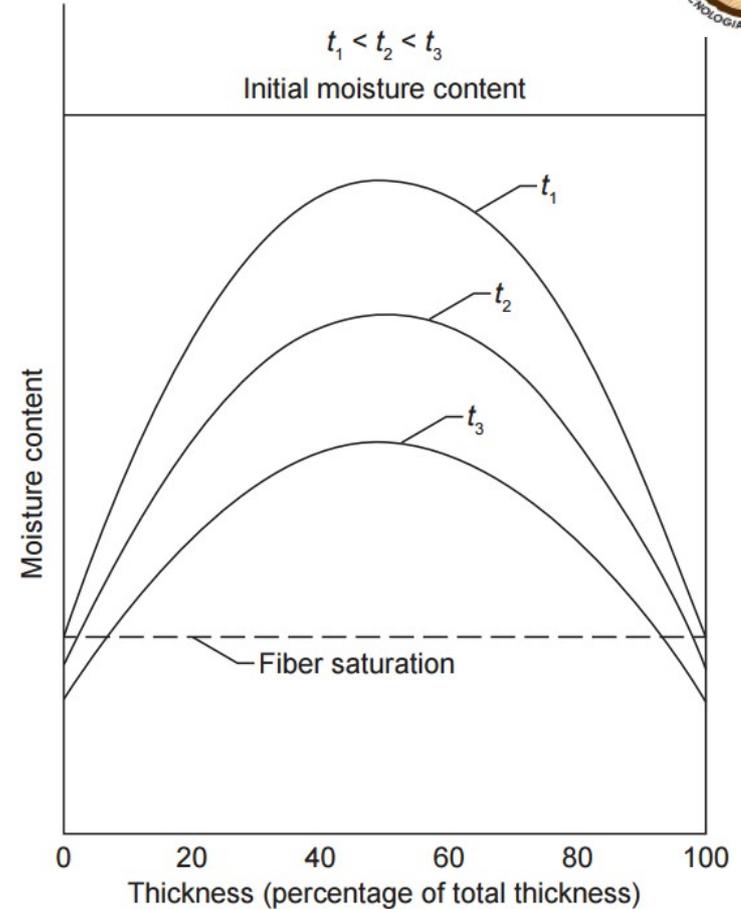
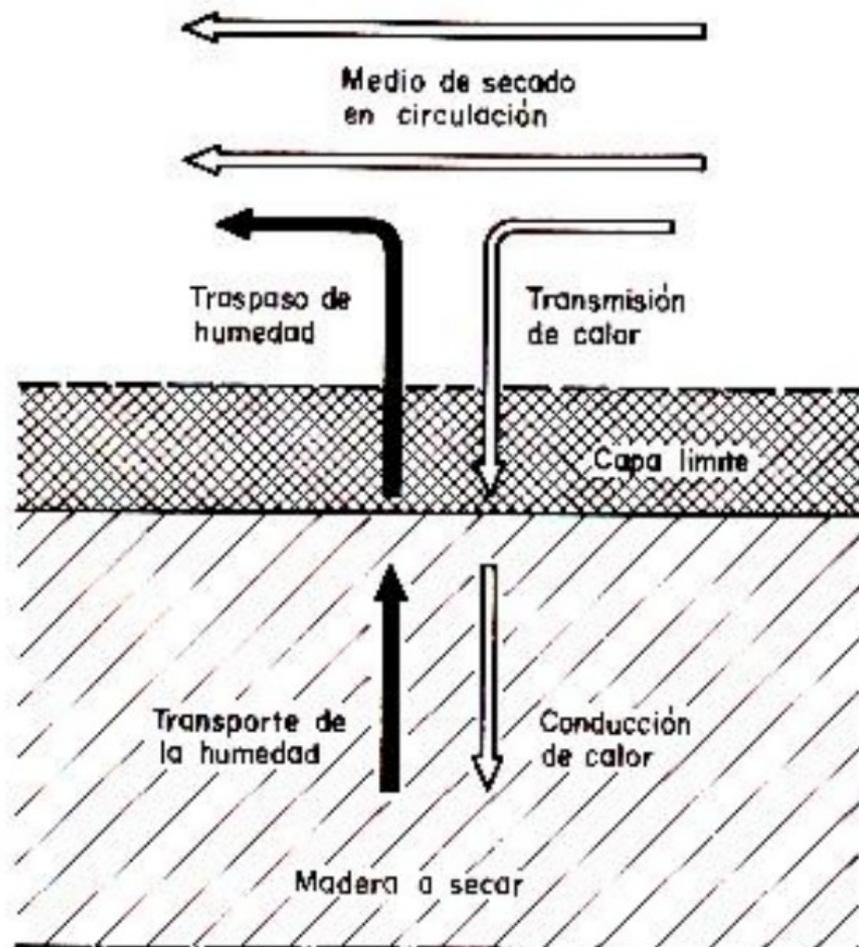


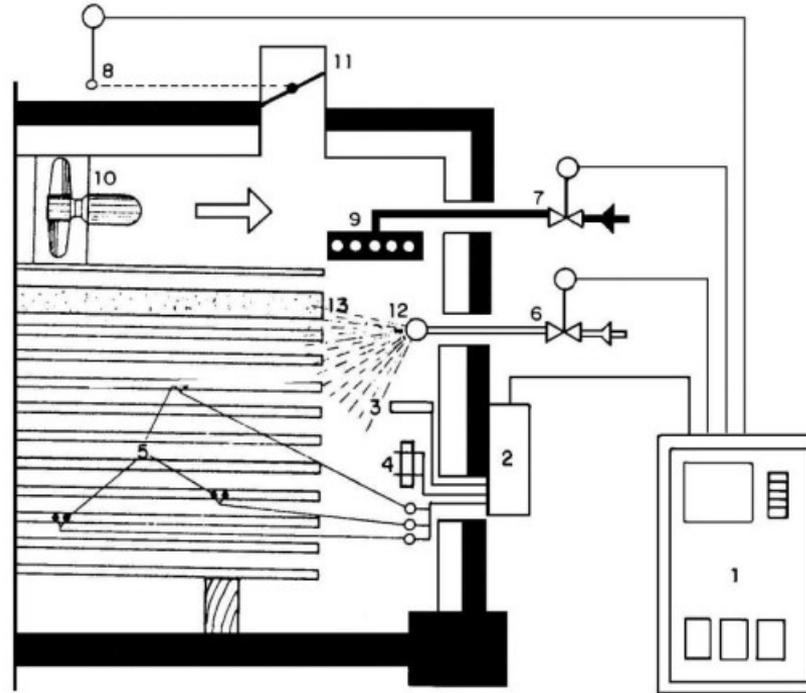
Figure 13–2. Typical moisture gradient in lumber during drying at time increasing from  $t_1$  to  $t_3$ .



El proceso de secado depende de:

Velocidad del aire, tipo del flujo.  
Temperatura fuera del aire y de la superficie.  
Humedad del aire y de la superficie.

Temperatura de la madera.  
Contenido de humedad de la madera.  
Potencial de transmisión de calor.  
Aptitud higroscópica.  
Permeabilidad.  
Anatomía de la madera.  
Potencial de consunción de humedad.



- |   |  |
|---|--|
| 1) Equipo de control.                   | 8) Control de las válvulas de entrada y salida del aire. |
| 2) Amplificador de valores de medición. | 9) Radiadores.   |
| 3) Sensor de temperatura.               | 10) Ventilador.  |
| 4) Sensores del clima.                  | 11) Válvulas de salida y entrada de aire.                |
| 5) Puntos de medición del contenido     | 12) Tobera de humidificación.                            |
| 6) Motoválvula para la humidificación   | 13) Peso de concreto (500 a 1,000 kg/m <sup>2</sup> ).   |
| 7) Motoválvula de calefacción           |  |





## 2.- Antecedentes.



United States  
Department of  
Agriculture

Forest Service

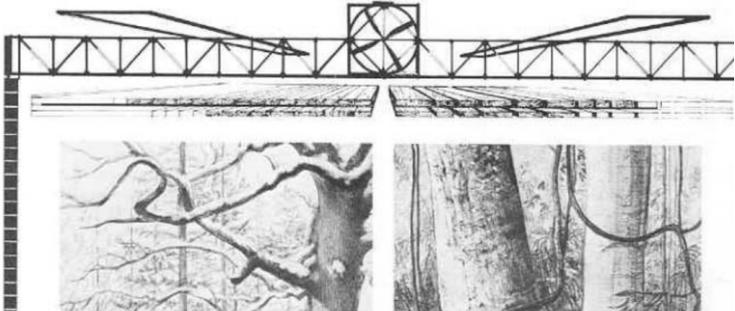
Forest  
Products  
Laboratory

General  
Technical  
Report  
FPL-GTR-57



# Dry Kiln Schedules for Commercial Woods Temperate and Tropical

R. Sidney Boone  
Charles J. Kozlik  
Paul J. Bois  
Eugene M. Wengert



Index of Schedules for Kiln-Drying United States and Canadian Softwood Species at Conventional Temperatures—con.  
A. Moisture Content-Controlled Schedules<sup>1</sup>

Common name (botanical name)	4/4, 5/4 stock	6/4 stock	8/4 stock	10/4 stock	12/4 stock	British Schedule <sup>2</sup> 4/4 stock	Comments
- - - - - Table number (schedule code) <sup>3</sup> - - - - -							
Pine—con.							
southern							
loblolly ( <i>Pinus taeda</i> )							
longleaf ( <i>P. palustris</i> )							3 by 5 timbers, use table 280.
shortleaf ( <i>P. echinata</i> )							
slash ( <i>P. Elliottii</i> )							
regular	272 (T13-C6)	267 (T12-C5)	267 (T12-C5)	244 (T10-C4)	244 (T10-C4)	L	
highest quality	279	279	279	244 (T10-C4)	244 (T10-C4)	—	
sugar ( <i>Pinus lambertiana</i> )							
light	214 (T5-E6)	214 (T5-E6)	213 (T5-E5)	—	—	L	
heavy	218 (T5-F6)	218 (T5-F6)	217 (T5-F5)	—	—	—	
western white ( <i>Pinus monticola</i> )	237 (T9-C5)	224 (T7-C5)	223 (T7-C4)	223 (T7-C4)	209 (T5-C3)	L	
Redwood ( <i>Sequoia sempervirens</i> )							
light	212 (T5-D6)	—	211 (T5-D4)	210 (T5-C4)	209 (T5-C3)	K	
heavy	202 (T4-F5)	201 (T3-F5)	200 (T3-F4)	—	—	—	
Spruce							
black ( <i>Picea mariana</i> )	252 (T11-B4)	—	241 (T10-B3)	204 (T5-A2)	204 (T5-A2)	K	
Engelmann ( <i>P. engelmannii</i> )	239 (T9-E5)	—	226 (T7-E4)	221 (T7-A4)	220 (T7-A3)	K	
red ( <i>P. rubens</i> )	252 (T11-B4)	—	241 (T10-B3)	204 (T5-A2)	204 (T5-A2)	K	
Sitka ( <i>P. sitchensis</i> )	265 (T12-B5)	264 (T12-B4)	251 (T11-B3)	207 (T5-B2)	207 (T5-B2)	J	
white ( <i>P. glauca</i> )	252 (T11-B4)	—	241 (T10-B3)	204 (T5-A2)	204 (T5-A2)	K	
Tamarack ( <i>Larix laricina</i> )	251 (T11-B3)	—	241 (T10-B3)	220 (T7-A3)	220 (T7-A3)	K	

<sup>1</sup>For uses where close control of final moisture content is required, such as furniture stock, cabinets, and millwork.

<sup>2</sup>Source: Timber Drying Manual, G. H. Pratt, 1974.

<sup>3</sup>U.S. Forest Products Laboratory code numbers from Agriculture Handbook 188, 1961.



### 3.- Justificación





## 4.- Objetivos

4.1 Objetivo general. El objetivo general del proyecto es pretender lograr el desarrollo físico y funcional de un monitor-control electrónico de humedad, temperatura, velocidad del aire, contenido de humedad en la madera, que me permita indicar si el contenido de humedad en equilibrio es alcanzado al valor recomendado acorde al tipo de madera que se trabaje en el horno de secado de forma puntual establecido por una secuela de secado, mediante el comparativo de 3 puntos de registro dentro del horno que muestren los mismos parámetros al mismo tiempo y que vaya indicando al operador en que paso de la secuela de secado se encuentra el proceso y si ya alcanzo las condiciones que establece la secuela de secado para que el operador ajuste la fuente de calor y/o las ventilas y/o sistema de aspersion y/o ventiladores de aire para el siguiente paso de la secuela hasta el final del proceso.



## 5.- Hipótesis

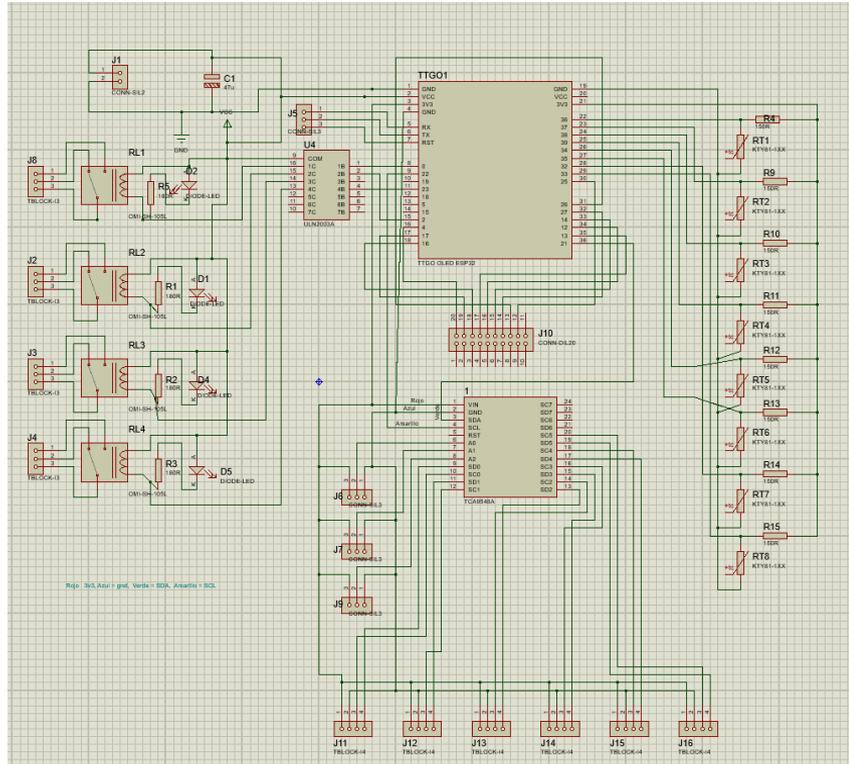
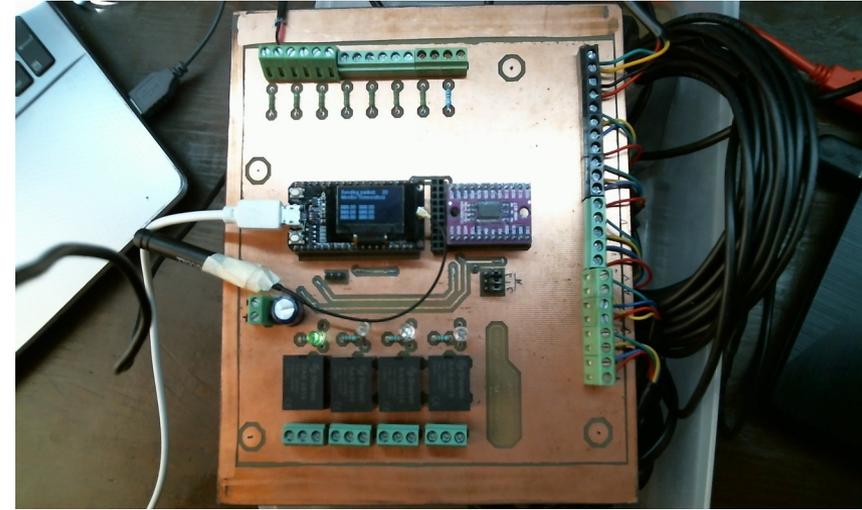


Mi hipótesis es que el desarrollo de un instrumento de monitoreo electrónico permitirá monitorear, controlar(a través del operador) y establecer el contenido de humedad de equilibrio (CHE) en la madera, al final del proceso de la secuela de secado, al valor recomendado y establecido por recomendación de acuerdo al tipo de madera de una sola especie que se fije en el programa de la secuela que se vaya a seguir con un rango de error de  $\pm 3\%$  de contenido de humedad de forma puntual dentro del sistema acorde a las características mecánicas de diseño de la estufa y basado en la recomendación de una secuelas de secado.



## 6.- Metodología.

### Tarjeta Electronica con monitoreo de Humedad y Temperatura





## Sensor de Humedad y Temperatura SHT20

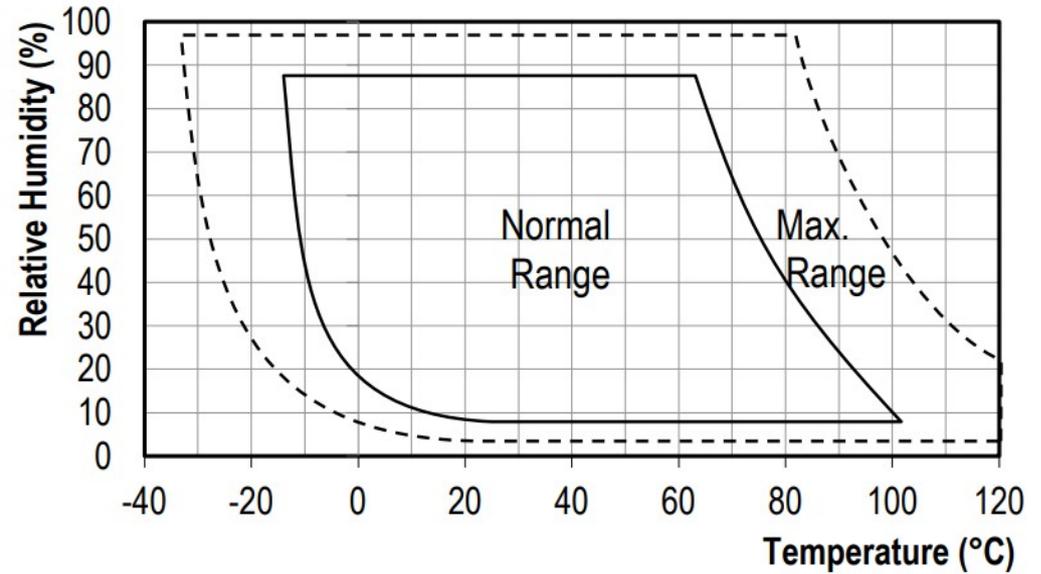
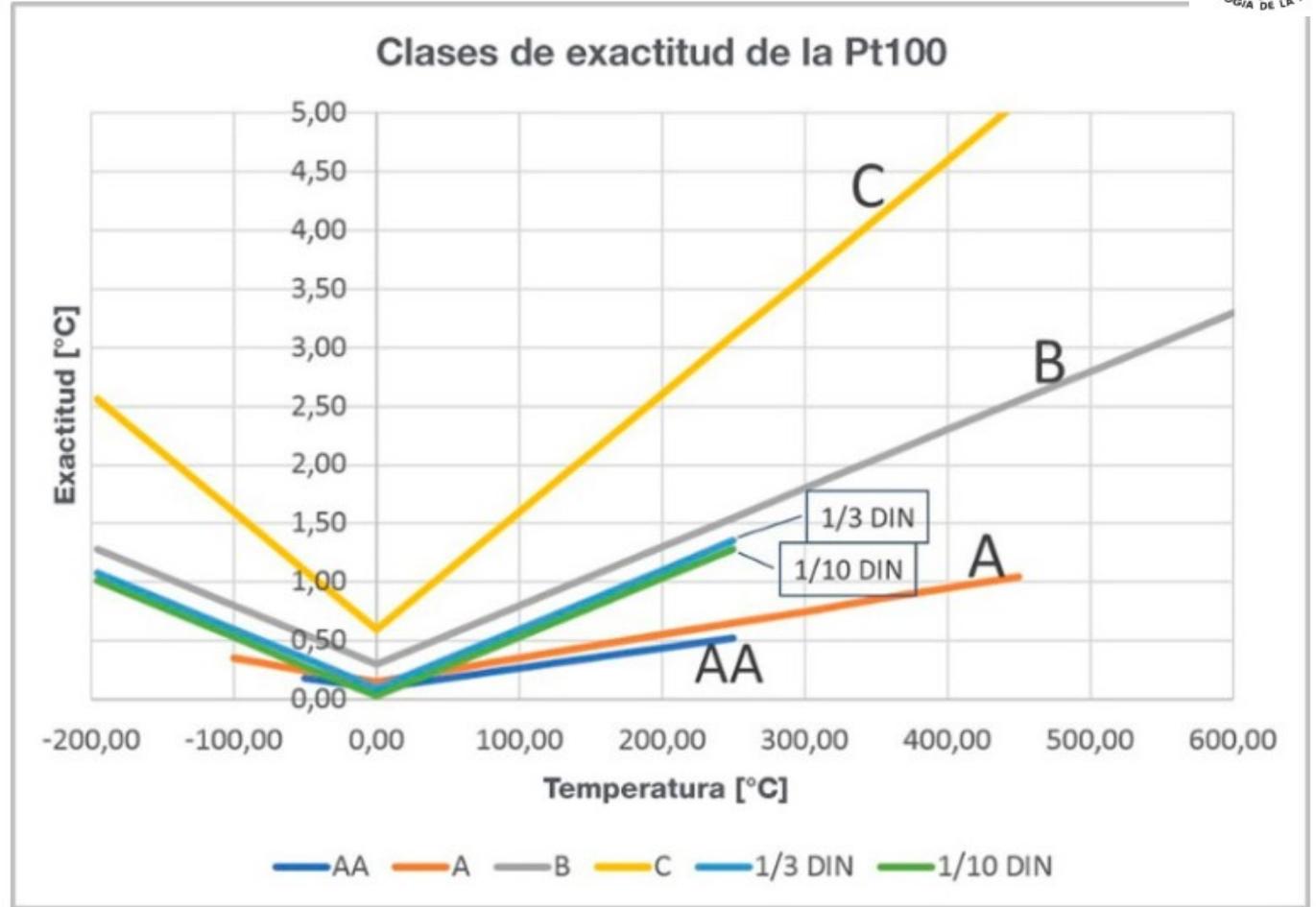


Figure Operating Conditions

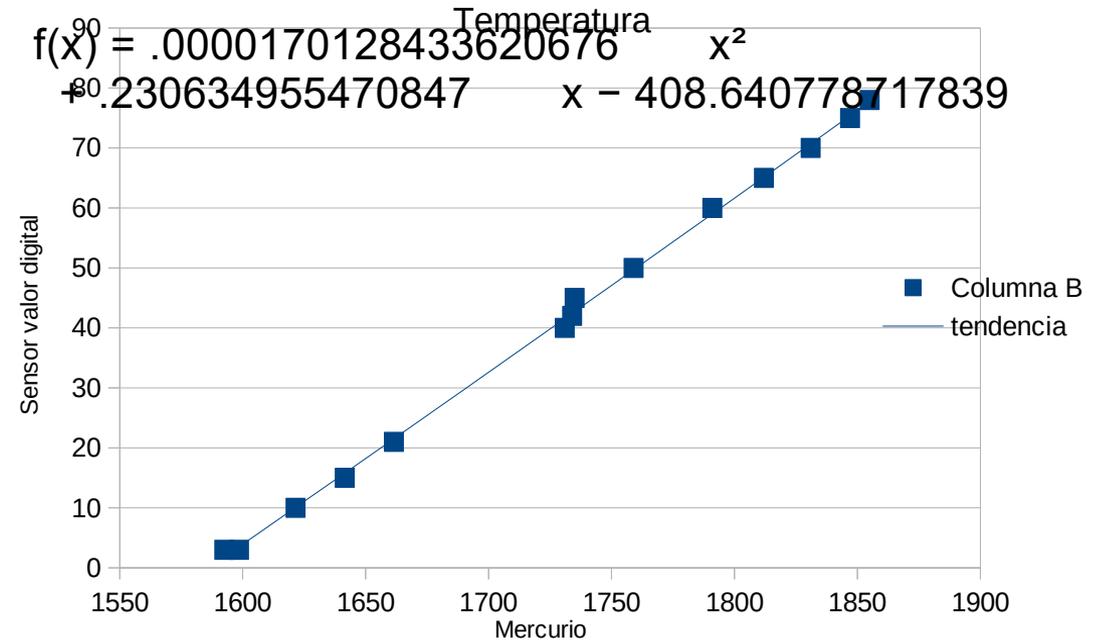
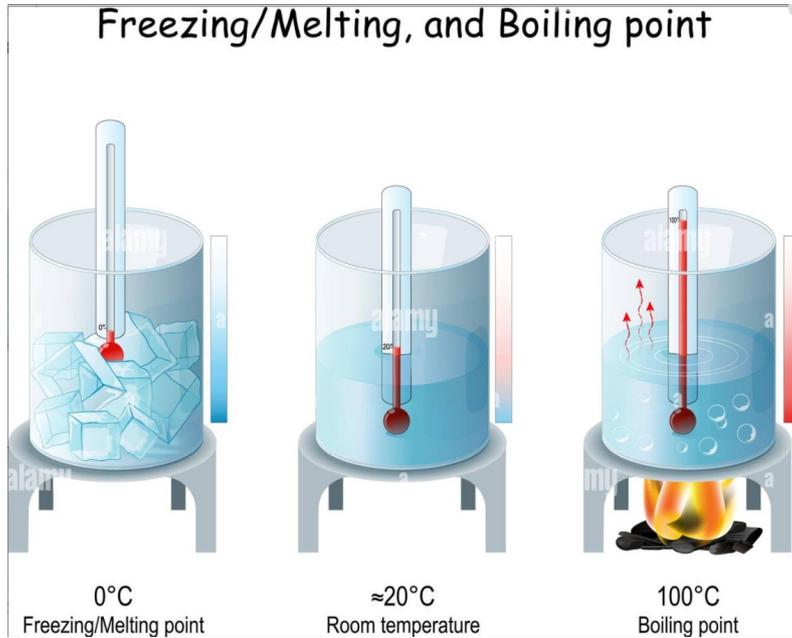


# Sensores PT100





## Calibracion PT100

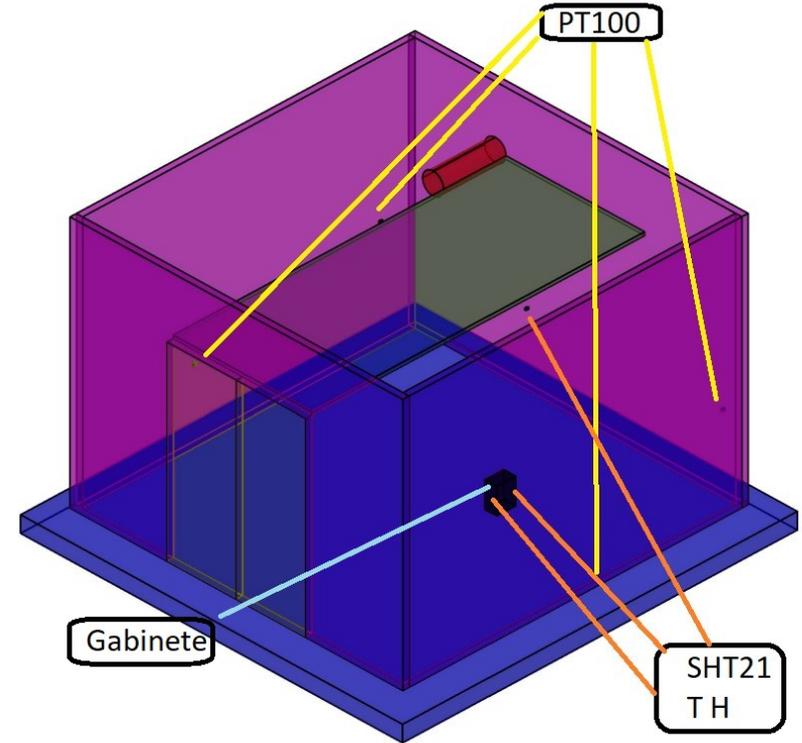
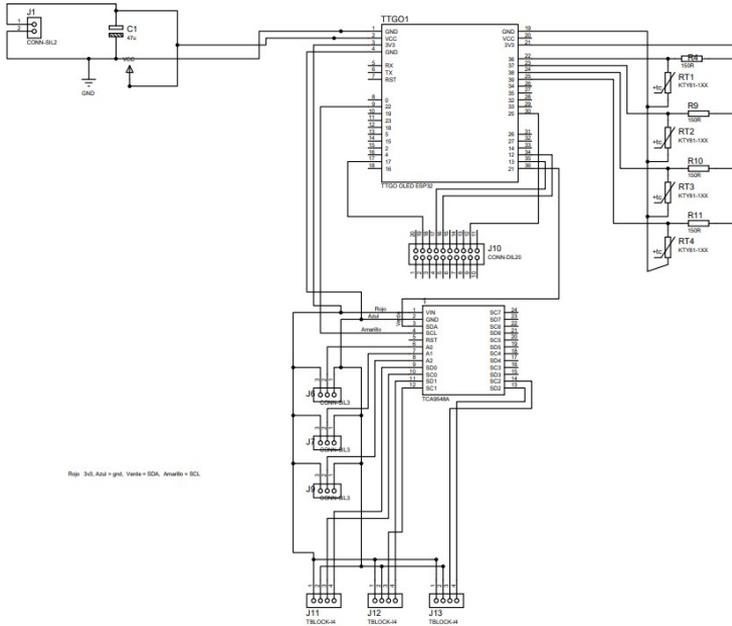








# Esquema electrónico actualmente instalado y utilizado en el horno de secado



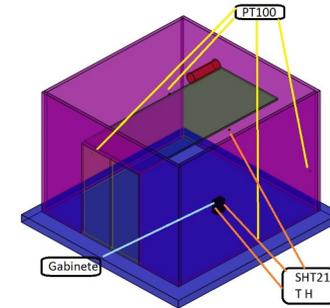
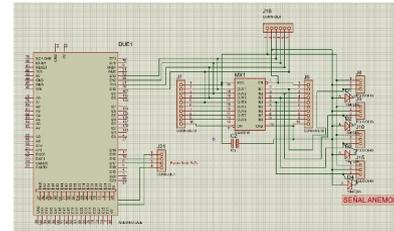
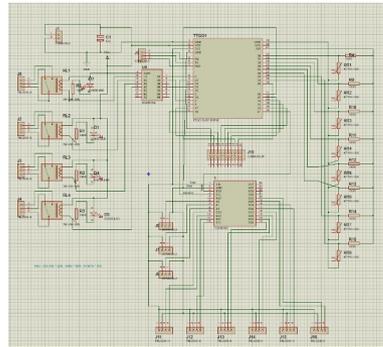
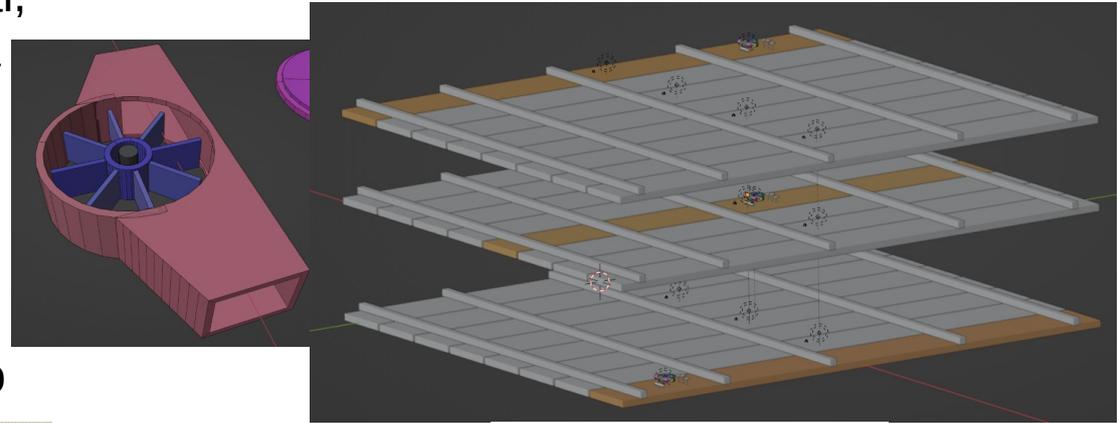
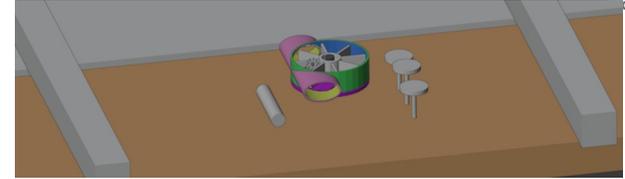


Las imágenes muestran la tarjeta y sensores colocados para monitoreo en condiciones reales.



## 6.- Discusión.

Considero que el proyecto ha ido creciendo semestre a semestre, en un principio considere igualar el control del horno actual, posteriormente vi la necesidad de crecer la cantidad de sensores debido a las condiciones reales de los hornos considerando sus deficiencias y por ultimo considere la necesidad de incluir la velocidad del aire, todo con características de monitoreo local principalmente y acceso remoto.





# Datos obtenidos de Humedad y Temperatura



ESP32\_Oled\_Tx\_TCA9548\_SHT20 Arduino 1.8.15

Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda

```

ESP32_Oled_Tx_TCA9548_SHT20
156   flag_inicio = 1;
157   }
158 }
159 }
160 }
161 void displayIoraData(String countStr) { MONITOREO TEMPERATURA HORNO
162   int i = 0;
163
164   display.clear();
165   display.setTextAlignment(TEXT_ALIGN_L
166   display.setFont(ArialMT_Plain_10);
167
168   display.drawString(0, 0, "Sending pac
169   display.drawString(90, 0, countStr);
170   display.drawString(0, 10, "Monitor Te: Estado-0
171   //display.drawString(0, 30, "T1= " +
172   display.drawString(0,20, String(analo
173   display.drawString(40,20, String(anal
174   for ( i = 0; i <= 2; i++ ) {
175     display.drawString(0, 30+i*10, Stri
176     display.drawString(40, 30+i*10, String(humd[i]));
177   }
178   //+" T2= " + String(analogValue_2)+"°C";
179   //display.drawString(0,30, "T3= " + String(analogValue_3)+"°C"+
180   //display.drawString(0,40, "T5= " + String(analogValue_3)+"°C"+
181   //display.drawString(0,50, "T7= " + String(analogValue_3)+"°C"+
182   display.display();
183 }
184
185 void showLogo() {
186   uint8_t x_off = (display.getWidth() - logo_width) / 2;
187   uint8_t y_off = (display.getHeight() - logo_height) / 2;
188 }

```

**HORNO de Secado Forzado de Madera**

Activacion Sistema

Activo

HORNO	VENTILAS	AIRE
HORNO OFF	VENTILAS OFF	AIRE OFF

Temperatura T1	Temperatura T2	Temperatura T3
18.00	17.00	17.00
Temperatura T4	Temperatura T5	Temperatura T6
18.00	-362.00	-306.00
TA°C HR% 1	TA°C HR% 2	TA°C HR% 3
999.00	54.21	54.44

```

4   Temperature:28.0C Humidity:14.6%
5   Temperature:27.1C Humidity:16.6%
1
T1 = 1693.00
Tlmap = 1693.00
28.00
28.23
0   Temperature:27.0C Humidity:16.7%
1   Temperature:27.6C Humidity:17.2%
2   Temperature:26.5C Humidity:17.8%
3   Temperature:26.7C Humidity:17.7%
4   Temperature:28.0C Humidity:14.5%
5   Temperature:27.1C Humidity:16.5%

```

ASH\_BOOT)

0,hd\_drv:0x00,wp\_drv:0x00

ya las 3:52 p. m.

204 TTGO LoRa32-OLED V1.80M  Autoscroll  Mostrar marca temporal Nueva línea 115200 baudio Limpiar salida



# Secuela de secado

<b>Especie:</b>	<u>Pinus Hartwegii</u>												
<b>Espesor:</b>	¾"												
<b>Programa:</b>	T13	F6											
<b>CH inicial</b>	130	%											
<b>CH final</b>	12	%											
<b>Uso:</b>	Madera para uso en carpintería de obra												
Etapa de Secado	Etapa de Temperatura Numero °F	Etapa de Depresion Numero	Clase de Contenido de Humedad		Programa de Temperatura Bulbo Seco		Programa de Depresion		Bulbo Humedo		Humedad Relativa %	Contenido de Humedad en Equilibrio %	Gradiente de Secado
			De:	A:	°C	°F	°C	°F	°C	°F			
<b>Calentamiento</b>													
	170	1	>	70	77	170	8	15	68	155	69	9.2	7.61
	170	2	70	60	77	170	11	20	66	150	60	7.8	7.69
	170	3	60	50	77	170	14	25	63	145	52	6.9	7.25
	170	4	50	40	77	170	17	30	60	140	45	5.7	7.02
	170	5	40	35	77	170	19	35	57	135	39	4.8	7.29
	170	6	35	30	77	170	19	35	57	135	39	4.8	6.25
	180	7	30	25	82	180	19	35	63	145	41	5	5.00
	180	8	25	20	82	180	19	35	63	145	41	5	4.00
	190	9	20	15	88	190	19	35	68	155	43	4.9	3.06
	190	10	15	10	88	190	28	50	60	140	28	3.3	3.03
Igualamiento		11	10	12	88	190	7	12	81	178	76	10	1.20
Acondicionamiento		12	12	12	88	190	2	4	86	186	92	15	0.80



## 7.- Resultados

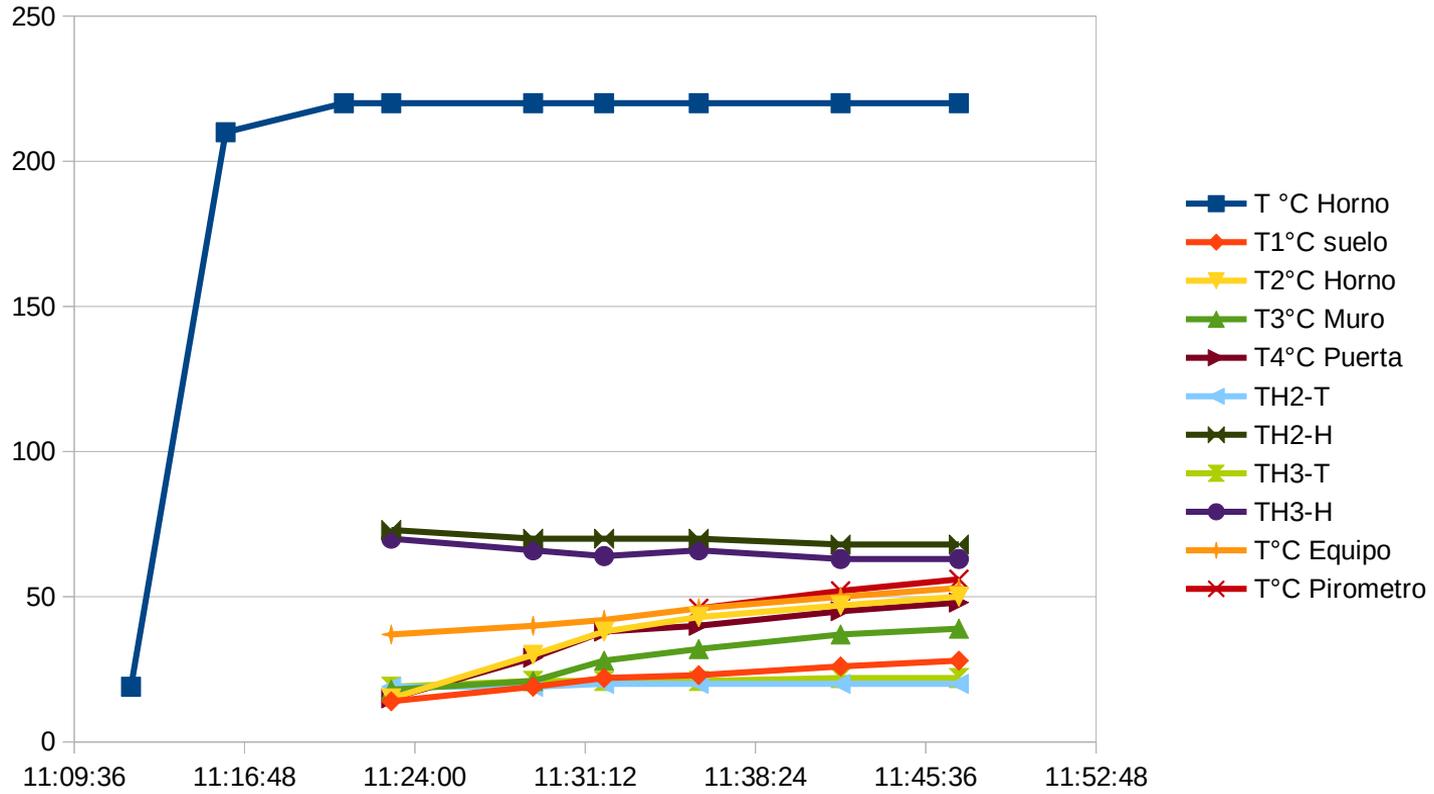


### Resultados parciales.

Se tiene avance en el desarrollo de la tarjeta electrónica de monitoreo y control, se tienen mediciones directas de los sensores de temperatura PT100 de los sensores de humedad y temperatura SHT22, de los sensores de electrodos por divisor de voltaje para medición de la resistividad que tiene la madera de acuerdo al nivel de humedad presente en la madera y del sensor de efecto hall para medir la velocidad del aire. Esta información ya es procesada y desplegada en una pantalla local que forma parte del arreglo electrónico que se está armando.

Se tiene avance en la programación del microcontrolador para mostrar resultados. Se tiene avance en el procesamiento de los datos obtenidos a partir de los sensores en forma local, se tiene avance en la información desplegada y enviada por radio frecuencia con protocolo LORA, se tiene avance en la información enviada por señal de WiFi configurado el microcontrolador ESP32 como servidor y como esclavo.

Se puede observar que los resultados obtenidos en las condiciones actuales ya empiezan a ser funcionales de tal forma que se pueden obtener mediciones con valores que empiezan a arrojar resultados, por ejemplo que el suelo tiene una mayor pérdida de calor que los muros, que la inyección del calor no es uniforme y esto provoca tener un gradiente de temperatura mayor provocando que en un futuro al medir el contenido de humedad en equilibrio de la madera pueda tener una variación amplia en las maderas dependiendo de su ubicación dentro del cuarto.





## Calculo transferencia de calor

$$Q = k * A * \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

→

$$\frac{\Delta T}{Q} = \frac{\Delta x}{k * A}$$

Q – Cantidad de calor

k – Conductividad térmica

Δx – distancia entre dos planos

A – Área superficie

ΔT – Diferencia temperatura de las 2 caras.

## Resistencia térmica

$$R_{th} = \frac{\Delta x}{k * A}$$



## Calor transferido

$$Q = \frac{\Delta T}{R_{th}}$$

para nuestro caso si consideramos que la ultima lectura nos representa una temperatura estable y en equilibrio tendríamos 3 condiciones por las temperaturas internas en piso, muero puerta y resto de muros y tomando una temperatura ambiente en el exterior.

$$T_s \text{ suelo} = 28 \text{ }^\circ\text{C} = 301 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$T_p \text{ puerta} = 48 \text{ }^\circ\text{C} = 321 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$T_m \text{ muro} = 39 \text{ }^\circ\text{C} = 312 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$T_{ext} \text{ exterior} = 21 \text{ }^\circ\text{C} = 294 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$Q \text{ suelo} = (301 - 294) / 0.007189 = 973.7098 \text{ W}$$

$$Q \text{ puerta} = (321 - 294) / 0.14016 = 192.6369 \text{ W}$$

$$Q \text{ muros techo} = (312 - 294) / 0.03169 = 568.0025 \text{ W}$$

$$Q_{Tot} = 973.7098 + 192.6369 + 568.0025 = 1734.3492 \text{ W}$$



## Cronograma de Proyecto

		1er Sem	2do Sem	3er Sem	4to Sem
1	Calibración sensores en tarjeta de MC	X			
2	Caracterización de Horno de secado		X		
3	Comunicación controlador local y/o remoto		X		
4	Control señales de salida quemador			X	
5	Control señal salida ventiladores			X	
6	Control señal salida ventilación humedad			X	
7	Programación lazo cerrado control temperatura y humedad.			X	
8	Programación secuela de secado			X	
9	Análisis de resultados desarrollo tarjeta electrónica para monitoreo y control de Horno de Secado				
10	Redacción de tesis				
11	Entrega de proyecto				



## 8.- Lectura citada



March 2021

Forest Products Laboratory. 2021. Wood handbook—wood as an engineering material. General Technical Report FPL-GTR-282. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 543 p.

Libro: Forest Products Laboratory. 2021. Wood handbook—wood as an engineering material. General Technical Report FPL-GTR-282. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 543 p.

APUNTES SECADO DE MADERA 2017, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, M. C. ROBERTO CALDERÓN MUÑOZ

Libro: MANUAL DEL GRUPO ANDINO PARA EL SECADO DE MADERAS. 1ra Edición. Derechos Reservados. Junta del Acuerdo de Cartagena, Copyright 1989. Lima 18, Perú. 350 p.

Libro: Dry Kiln Operator's Manual. Edited by William T. Simpson, Research Forest Products Technologist, Revised August 1991, Agriculture Handbook 188, United States Department of Agriculture.

Libro: Boone, R. Sidney; Kozlik, Charles J.; Bois, Paul J.; Wengert, Eugene M. 1988. Dry kiln schedules for commercial woods-temperate and tropical. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-57. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 158 p.

Freddy Muñoz Acosta, Secado de la madera aserrada, 2008

Tesis: Rodríguez Suarez, C. D. (2017), ESTUDIO DEL PROCESO DE SECADO DE MADERA MEDIANTE EL USO DE HORNOS A GAS EN LA EMPRESA JAM MADERAS, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira Colombia.



Gracias