



INSTITUTO POLITÉCNICO  
NACIONAL



UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA EN INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS  
AVANZADAS

OSCILACIONES Y ÓPTICA

---

## Proyecto: Pirómetro digital de radiación

---

*Autor:*

Hernández Jiménez Daniel

*Profesor:*

Sol Gordillo Álvaro

Ingeniería Mecatrónica

24 de agosto de 2022

## Resumen

Se realizó la caracterización de un sensor de color TCS3200, que posteriormente fue utilizado para la construcción de un pirómetro digital de radiación. Además se llevó a cabo un análisis de las temperaturas y condiciones de operación óptimas para el funcionamiento del sensor.

**Palabras clave** Pirómetro, sensor de color, intensidad luminosa, temperatura, longitud de onda, cuerpo negro, ley de Wien, caracterización.

## 1 Introducción

En varios procesos industriales, se trabajan con materiales a altas temperaturas y muchas veces no es posible medir la temperatura de los objetos de manera directa, puesto que las temperaturas llegan a ser demasiado elevadas. Otra complicación, puede ser también, que el proceso se lleve a altas velocidades o no pueda ser invadido por un cuerpo externo.

Bajo esta problemática se han desarrollado dispositivos llamados pirómetros. Estos son capaces de medir la temperatura a distancia. Los hay de diferentes tipos según el principio de funcionamiento. [1]

- Ópticos: Hace uso de un patrón, generalmente un filamento. El color del objeto es comparado con el del filamento a una cierta temperatura.
- Radiación: Se basan en que cualquier cuerpo que tiene una temperatura por encima de 0°C irradiará una determinada energía.

La propuesta de este trabajo es desarrollar un pirómetro digital de radiación con materiales accesibles. Después se analizarán las prestaciones del dispositivo como lo son las temperaturas que pueda medir con validez, así como las longitudes de onda.

### 1.1 Teoría del pirómetro de radiación

Un cuerpo está en constante interacción con las radiaciones de los objetos a su alrededor y las radiaciones provenientes de su interior. La radiación es fruto de la transmisión de energía [2, pág. 41]. Cada cuerpo irradia y está siendo irradiado. Esta interacción se da en la superficie de los cuerpos.

Un cuerpo real, absorbe parte de la radiación exterior que incide en él y la demás la refleja. Pasa lo mismo con la radiación interior [3]. Una representación gráfica de esto, se expone en la figura 1.

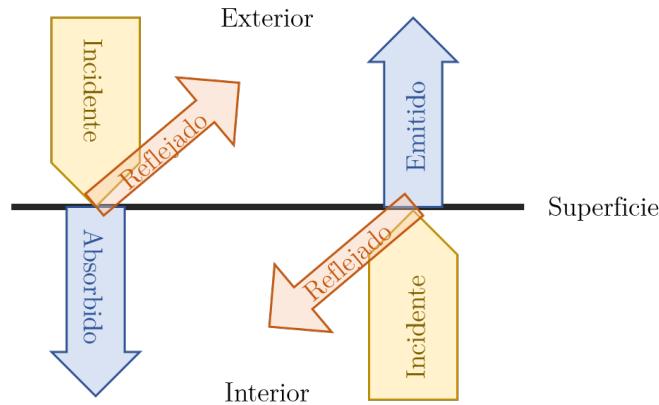


Figura 1. Radiación en la superficie de un cuerpo.

Los cuerpos tienen la misma capacidad para absorber que para emitir radiación.

De manera teórica se ha desarrollado el concepto de cuerpo negro, que es un cuerpo que no refleja nada de la luz incidente [4]. En la vida real no existen materiales con estas características. Sin embargo, nos ayuda a comprender el fenómeno físico descrito por la Ley desplazamiento de Wien [5], que relaciona la máxima longitud de onda irradiada por un cuerpo negro y su temperatura. La expresión es la siguiente:

$$\lambda_{max} = \frac{0.0028976 \text{ mK}}{T} \quad (1)$$

En el caso de los cuerpos grises, existe una relación entre la radiación emitida por un cuerpo negro y un cuerpo gris a una misma temperatura. Esta relación se llama coeficiente de emisividad [6].

Así que en realidad para medir sería necesario considerar los diferentes coeficientes de emisividad para cada material en el modelo del pirómetro. Sin embargo, en este trabajo se utilizará como cuerpo una parrilla de acero, cuyo coeficiente de emisividad es cercano a 1 [7].

El coeficiente de emisividad se relaciona con la temperatura y la radiación emitida por un objeto, como lo describe la Ley de Stefan-Boltzmann [8], mostrada a continuación.

$$I = e\sigma T^4 \quad (2)$$

donde:

I = radiación o intensidad

e = emisividad del material

$\sigma$  = constante de Stefan-Boltzmann =  $5,67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$

T = temperatura del cuerpo

## 2 Desarrollo

En cuanto a los aspectos funcionales del proyecto solo se necesita un sensor, que sea sensible (valga la redundancia), a la longitud de onda emitida por los objetos. Y como segundo elemento más importante, se necesita una unidad de procesamiento para llevar a cabo la lectura, procesamiento y desplegar los datos.

Así que como unidad de procesamiento se utilizará una placa Arduino Nano [9] y como sensor el circuito integrado TCS3200 [10], este se obtuvo embebido en un módulo que facilita su manejo.

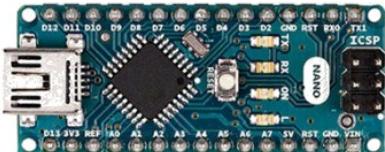


Figura 2. Arduino Nano



Figura 3. Modulo TCS3200

El sensor cuenta con 64 foto diodos, en arreglo de matriz; 16 con filtro rojo, 16 con filtro azul, 16 con filtro verde y 16 sin filtro. El sensor, entrega a la salida una señal de pulso cuadrado, esta señal tiene una frecuencia que es directamente proporcional a la intensidad. Ya que para conocer la temperatura se necesita conocer la longitud de onda máxima emitida, es más conveniente utilizar los foto diodos sin filtro. Pues, como muestra la figura 4, son los que tienen la mayor receptividad relativa así, no tendrán que realizarse procesamientos extra que determinen que foto diodo tiene la lectura mayor. Para llevar al sensor a esta configuración es necesario llevar la señal S2 a *alto* y la señal S3 a *bajo*.

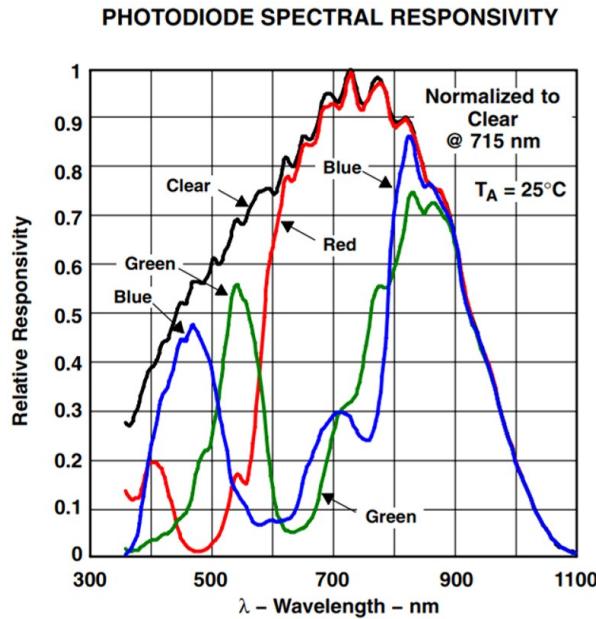


Figura 4. Respuesta relativa según el datasheet del TCS3200 [10]

Para tener buena compatibilidad con el Arduino, se debe configurar la escala de frecuencia de salida del sensor al 100 %. Para esto se configuran los pines S0 y S1 en *alto*.

Ahora bien, se necesita caracterizar el sensor, es decir, interpretar las lecturas de la señal para ser usadas en el pirómetro. Para ello es conveniente utilizar un medidor de temperaturas ya funcional. Así que un termopar tipo K y el módulo MAX6675 son elegidos para realizar la tarea.

Para realizar la prueba y registro de los datos se eligió como objeto una parrilla como la mostrada en la figura 5



Figura 5. Parrilla eléctrica para caracterizar el sensor [11]

Se realizaron las debidas conexiones [A.1] (se agregaron además un módulo bluetooth, switch, divisor de tensión, regulador de 5V y pines para fuente de voltaje ) y se programó el Arduino para enviar los datos del termopar y las lecturas del sensor con filtro rojo, verde, azul y sin filtro [A.2]. Estos datos fueron recopilados e ingresados automáticamente en un archivo de *Excel* por medio de un software que el autor desarrolló [12].

## 2.1 Recolección de datos para la caracterización del sensor

### 2.1.1. Procedimiento

Primero que nada se realizaron las conexiones según el esquemático, pero omitiendo los componentes que no eran necesarios (HC05, LM7805 y switch).

Después, el sensor, ya conectado a los demás componentes, fue suspendido con la ayuda de hilo de forma tal, que quedara encima de la parrilla a una cierta altura. La punta del termopar fue posicionada y sujetada a la parrilla, amarrándola con un alambre a una sección de la resistencia.

EL Arduino fue conectado a la computadora y esta, lista con el software necesarios. Fotos del experimento se muestran en las figuras 6, 7 y 8.

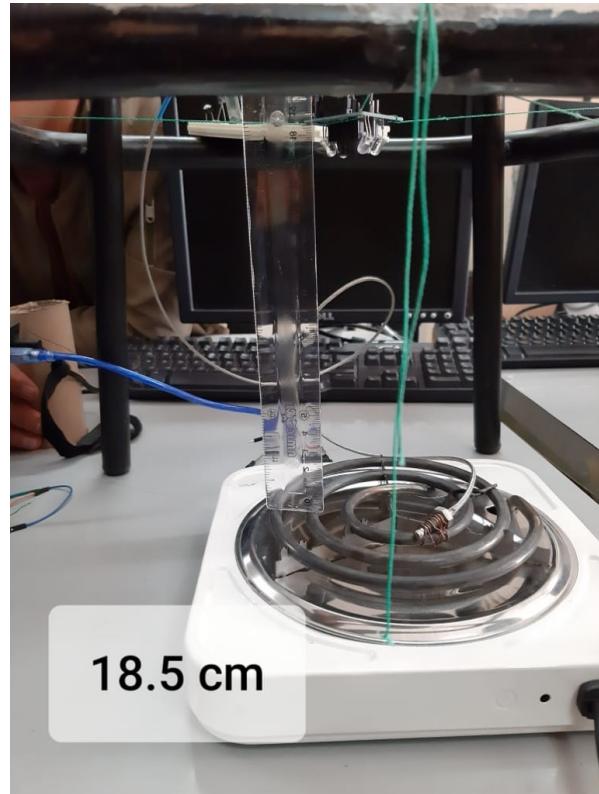


Figura 6. La medición de la altura  
del sensor respecto a la parrilla



Figura 7. El sensor amarrado sobre la parrilla



Figura 8. Experimento listo para comenzar

Finalmente se conectó la parrilla y se comenzó la captura de datos. La parrilla empezó en 25°C y el experimento terminó cuando alcanzó los 600°C.

### 2.1.2. *Resultados*

Los datos recabados en el archivo de Excel mostraron que la señal entregada por los diferentes filtros no está normalizada, o sea que no tienen un mínimo ni un máximo común y por lo tanto no se pueden comparar de forma directa. Así que, se realizó un mapeo de los datos primero. Para esto primero se normalizó cada una de las series de datos, dividiendo todos los datos entre el valor máximo de la serie. Después, a estas nuevas series de datos, se les restó a todos los datos de la serie, el valor mínimo. De esta forma garantizamos que los valores estén dentro del rango de 0 a 1.

Una vez obtenido el mapeo de los datos, se obtuvo primero una gráfica de la intensidad luminosa contra la temperatura, para la serie de datos de filtro rojo, verde, azul y sin filtro. Esta gráfica se muestra en la figura 9

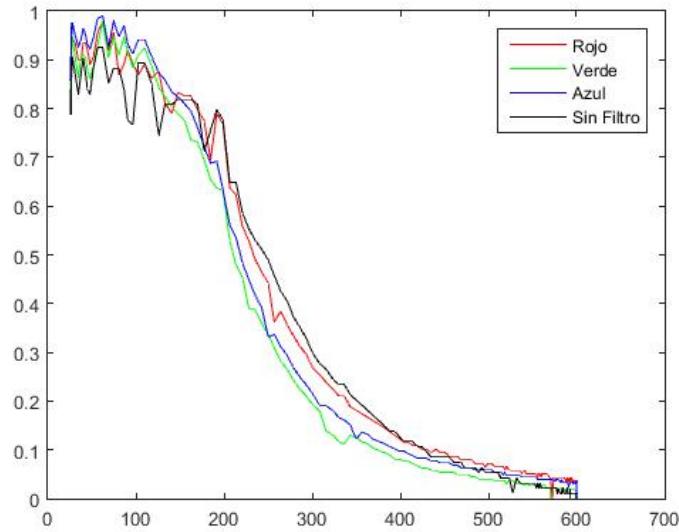


Figura 9. Intensidad luminosa de los diferentes foto diodos VS temperatura

Se puede apreciar que en realidad, la señal sin filtro, no es la mayor en todos los puntos de la gráfica. Así que para evaluar si es mejor utilizar los valores máximos de RGB, se gráfica ahora la señal generada al evaluar la intensidad máxima con filtros y sin filtros (figura 10).

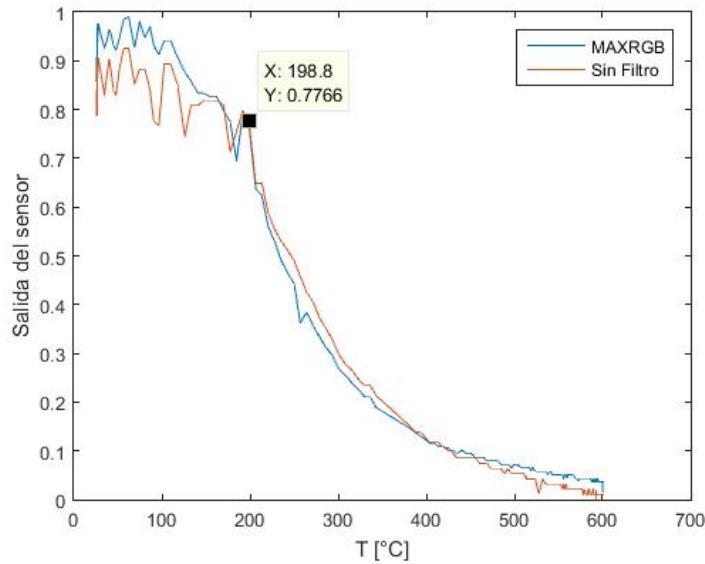


Figura 10. Señal de máximo RGB y señal sin filtro VS temperatura

Es evidente que los datos son muy dispersos al inicio de la gráfica. Es aún más visible en la figura 11. De manera visual podemos identificar donde los datos comienzan a comportarse más estables. Ese punto resulta ser a  $T = 198.8^{\circ}C$ .

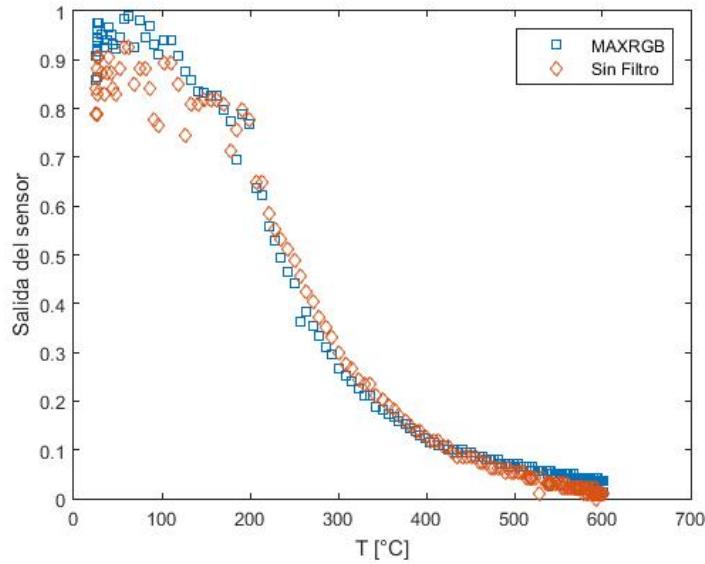


Figura 11. Señal discreta de máximo RGB y señal sin filtros VS temperatura

#### 2.1.3. Discusión y análisis de resultados

El hecho de que los valores sean muy dispersos en el rango de temperaturas de 25 a 198.8°C, significa que el sensor tiene problemas para detectar ese orden de longitudes de onda. Hay que recordar que el sensor estaba a una distancia de 18.5cm de la parrilla. Queda pendiente el análisis de la variación de la intensidad con respecto a la distancia. Sin embargo, según la experiencia previa con este sensor (viendo los datos que arroja para un mismo color a diferentes distancias), sí varía. Por lo que, puede que ese rango de temperaturas se vea afectado por la distancia entre el sensor y el objeto. Una explicación a esto puede ser que, a 18.5cm de la parrilla, es hasta los 198.8°C que, la intensidad de la luz emitida por la parrilla, es suficiente para llegar hasta el sensor.

Calculando dichas longitudes mediante la ley de Wien (considerando un cuerpo negro), se tiene que:

$$\lambda(T = 25^\circ\text{C} = 298.15K) = \frac{0.0028976mK}{298.15K} = 9718.6\text{nm}$$

$$\lambda(T = 198.8^\circ\text{C} = 298.15K) = \frac{0.0028976mK}{298.15K} = 6139.6\text{nm}$$

Sin embargo, el sensor funciona con foto diodos, cuya respuesta varía dependiendo de la intensidad recibida. Estos tienen un rango de saturación y de corte, que resulta ser de entre 360 nm (saturación) y 1100 nm (corte), ya que son foto diodos de silicio. Esto quiere decir que el sensor no es capaz de detectar las longitudes de onda emitidas por el objeto calentado.

Lo que explica la respuesta del sensor a la radiación emitida por la parrilla a altas temperaturas, es que el cuerpo no emite sólo una longitud de onda, sino que emite un rango de longitudes de onda con diferente magnitud de radiación. Por lo que el sensor no está leyendo la longitud de onda con máxima radiación, sino otras dentro del rango de 360nm a 1100 nm. Esto hace que no sea fácil calcular la longitud de onda leída, pero por medio de la caracterización, de todas formas se puede utilizar para saber la temperatura a partir de la lectura del sensor.

#### 2.1.4. Conclusiones

El pirómetro está limitado a las longitudes de onda y por lo tanto a las temperaturas que el sensor puede detectar de manera relativamente precisa. El pirómetro debe estar a 18.5 cm de distancia para asegurar una lectura fiel y la temperatura mínima debe ser de 198.8°C.

## 2.2 Caracterización del sensor

Una vez obtenidos los resultados y llegados a la conclusión de que no son todos los datos válidos, se procede a recortar esos datos. Luego, con los datos restantes se realiza un ajuste por mínimos cuadrados en *Curve Expert* [13].

Probando con varios modelos, se encontró que el modelo Hoerl, es uno de los 3 modelos con mayor coeficiente de correlación con los datos. También, de los primeros 3, es el más sencillo. Y tiene la siguiente forma:

$$y = ab^x x^c$$

Donde, para esta aplicación:

$$\begin{aligned} y &= T(\text{Temperatura en Kelvin}) \\ x &= \text{Salida del sensor} \\ a &= 1592.94236882059 \\ b &= 1.00094211544372 \\ c &= -0.295805520537105 \end{aligned}$$

La gráfica de esta función se muestra a continuación:

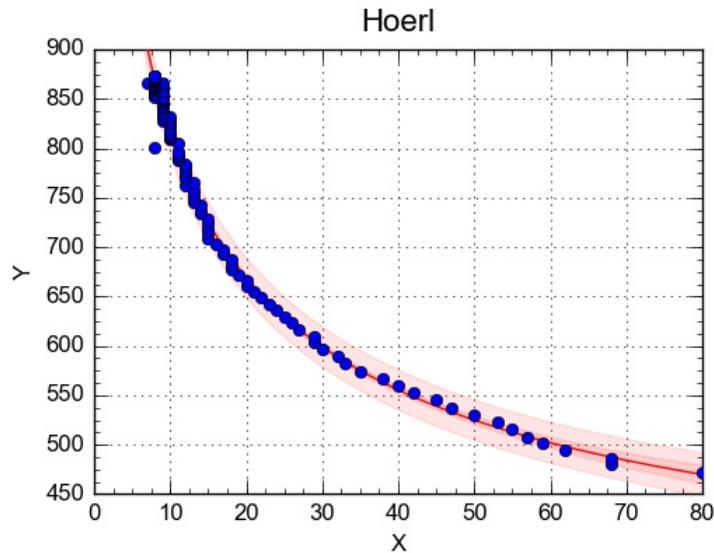


Figura 12. Modelo de Hoerl para los datos obtenidos.

## 2.3 Construcción del pirómetro

Una vez que ya se tiene un modelo para la caracterización del sensor, este es ingresado en el Arduino como el archivo de programación de operación del dispositivo [A.5].

Luego, a partir del esquemático, se diseñó un circuito impreso [A.3]. Lo que resultó, después de soldar todos los componentes, en la placa mostrada en la figura 13.

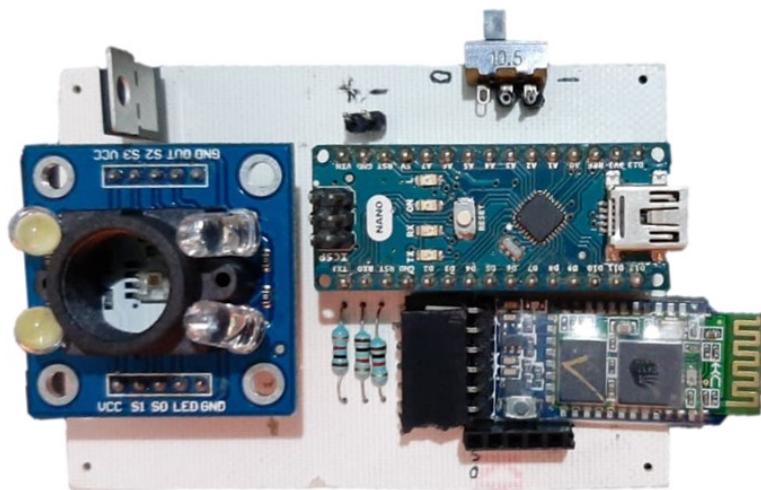


Figura 13. Placa con componentes soldados.

Ahora bien, como antes se había mencionado, se agregó un bluetooth al esquemático y al circuito impreso. El objetivo del bluetooth, es enviar los datos por medio de una app (creada con la herramienta *App Inventor* [14]) a algún dispositivo móvil con sistema operativo Android.

La aplicación en cuestión, fue desarrollada por el autor. Cuenta con un botón para conectar con el dispositivo bluetooth y otro para cambiar las unidades de la temperatura mostrada en pantalla, como se puede apreciar en la figura 14.



Figura 14. Captura de pantalla de las ventanas principales de Thermy.

Finalmente, se diseñó una carcasa con el fin de proteger los componentes y por medio de un tubo, cuyo eje está alineado con el eje óptico del pirómetro, se buscó limitar la cantidad de luz exterior que recibe el pirómetro. Ya que, las radiaciones que recibe el pirómetro son las reflejadas por los objetos del entorno más los emitidos y reflejados por el cuerpo estudiado. Los modelos de la carcasa se muestran en las figuras 15 y 16.

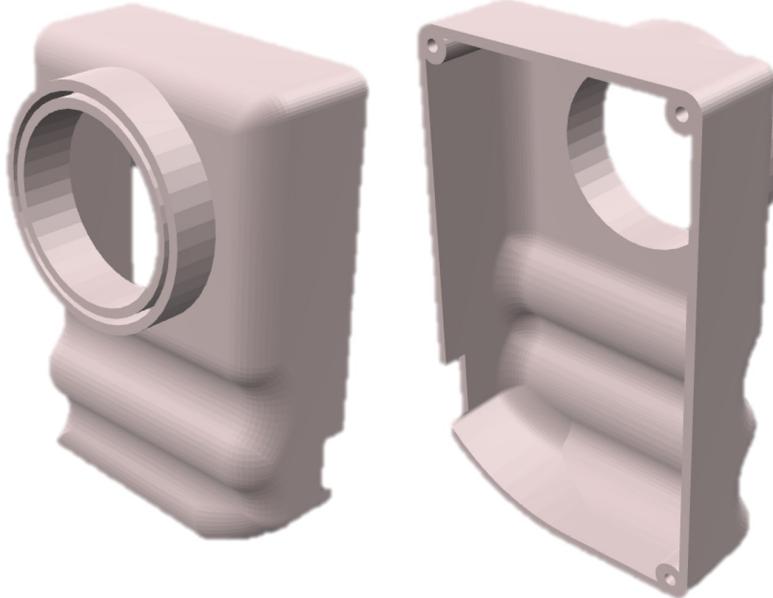


Figura 15. Modelo de la parte superior de la carcasa.

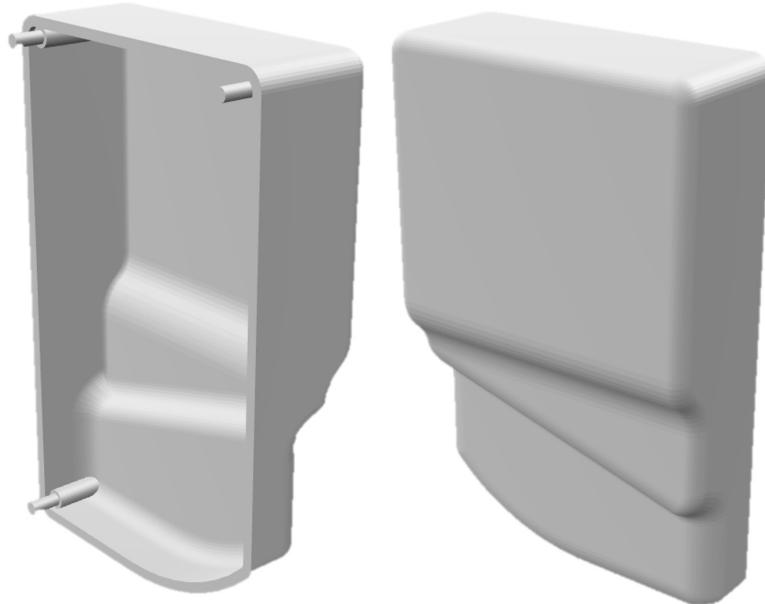


Figura 16. Modelo de la parte inferior de la carcasa.

En la figura 17 se muestran fotos del pirómetro completo.



Figura 17. Foto del pirómetro en cuerpo completo.

### 3 Conclusiones

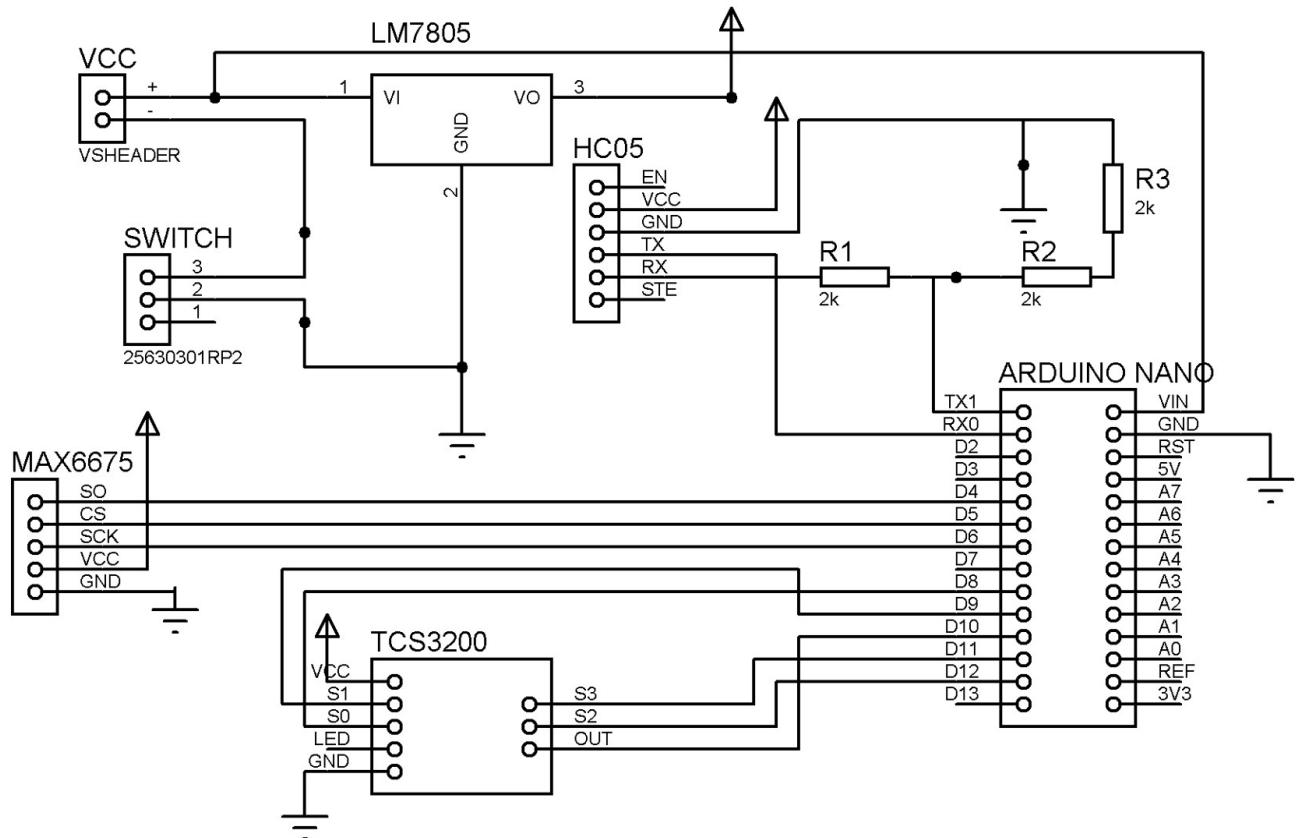
Se logró construir el pirómetro. Este tiene que estar posicionado a 18.5 cm de distancia del objetivo para obtener las mediciones esperadas y las temperaturas que mide son de entre 198.8°C a 600°C. Ya que para temperatura más bajas a 198.8°C, tiene un error de lectura considerable.

## Referencias

- [1] *Tipos de pirómetro, para que sirven.* 2019. URL: <http://www.memtec.es/tipos-de-pirometro-para-que-sirven/>.
- [2] Ramon Ordiales. «Prontuario de la radiación electromagnética». En: (2007).
- [3] Ángel Franco García. *La radiación del cuerpo negro.* Nov. de 2019. URL: <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/cuantica/negro/radiacion/radiacion.htm>.
- [4] Roberto Martínez. «La teoría de la radiación del cuerpo negro». En: *Momento* 19 (1999), págs. 59-75.
- [5] *Ley de Wien.* Nov. de 2019. URL: [https://www.ecured.cu/Ley\\_de\\_Wien](https://www.ecured.cu/Ley_de_Wien).
- [6] López. G. Freddy. A and Zurita. R Ronny. A. *Pirómetros.* 2016. URL: <https://instrumentacionuc.wixsite.com/facultad-ingenieria/copia-de-termopozos>.
- [7] *Emisividades de los materiales más importantes.* 2019. URL: [https://www.testo.com/es-ES/Emisividades+de+los+materiales+m%5C%C3%5C%Alst+importantes/services\\_knowledgeable\\_thermography\\_emissivity\\_table](https://www.testo.com/es-ES/Emisividades+de+los+materiales+m%5C%C3%5C%Alst+importantes/services_knowledgeable_thermography_emissivity_table).
- [8] *Ley de Stefan-Boltzmann.* 2019. URL: [http://fisiplus.blogspot.com/2014/11/ley-de-stefan-boltzmann\\_25.html](http://fisiplus.blogspot.com/2014/11/ley-de-stefan-boltzmann_25.html).
- [9] *Arduino Nano.* 2019. URL: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-nano>.
- [10] *TCS3200, TCS3210 PROGRAMMABLE COLOR LIGHT-TO-FREQUENCY CONVERTER.* Jul. de 2019. URL: <https://www.mouser.com/catalog/specsheets/TCS3200-E11.pdf>.
- [11] *Parrilla Taurus 1 quemador Alpha.* 2019. URL: <https://www.chedraui.com.mx/Departamentos/Electrodom%C3%9C%C3%5C%A9sticos/Cocci%C3%9C%C3%5C%B3n-E1%C3%9C%C3%5C%A9ctrica/Parrillas-El%C3%9C%C3%5C%A9ctricas/Parrilla-Taurus-1-quemador-Alpha/p/00000000003248832?siteName=Sitio+de+Chedraui>.
- [12] *SerialExcelRecorder.* Nov. de 2019. URL: <https://github.com/danielhj1998/SerialExcelRecorder>.
- [13] *CurveExpert.* 2019. URL: <https://www.curveexpert.net/>.
- [14] David Wolber. «App inventor and real-world motivation.» En: *SIGCSE.* Vol. 11. 2011, págs. 601-606.

## A Apéndice 1

### A.1 Esquemático



### A.2 caracterizacion.ino

```

1 #include "max6675.h"
2
3 /**
4 // Cableado de TCS3200 a Arduino
5 /**
6 #define S0 8
7 #define S1 9
8 #define S2 12
9 #define S3 11
10#define salidaSensor 10
11
12 /**
13 //Cableado del max6675 al arduino
14 /**
15#define thermoSO 4
16#define thermoCS 5
17#define thermoSCK 6
18
19 MAX6675 thermocouple(thermoSCK, thermoCS, thermoSO);
20
21 // Para guardar las frecuencias de los fotodiodos
22 int frecuenciaRojo = 0;
23 int frecuenciaVerde = 0;
24 int frecuenciaAzul = 0;
25 int frecuenciaBlanca = 0;

```

```
26
27 void setup() {
28     // Definiendo las Salidas
29     pinMode(S0, OUTPUT);
30     pinMode(S1, OUTPUT);
31     pinMode(S2, OUTPUT);
32     pinMode(S3, OUTPUT);
33
34     // Definiendo salidaSensor como entrada
35     pinMode(salidaSensor, INPUT);
36
37     // configurando la escala de frecuencia del sensor a 100%
38     digitalWrite(S0,HIGH);
39     digitalWrite(S1,HIGH);
40
41     // Iniciar la comunicacion serial
42     Serial.begin(9600);
43
44     // wait for MAX chip to stabilize
45     delay(500);
46 }
47
48 void loop() {
49     if(Serial.available())//si se est    recibiendo una instruccion
50     {
51         //Se lee el caracter de entrada
52         char op=Serial.read();
53         if(op == 's'){
54             while(true){
55                 principal();
56             }
57         }
58     }
59 }
60
61 void principal(){
62     lecturaRGBW();
63     Serial.println(frecuenciaRojo);
64     Serial.println(frecuenciaVerde);
65     Serial.println(frecuenciaAzul);
66     Serial.println(frecuenciaBlanca);
67
68     Serial.println(thermocouple.readCelsius());
69
70     delay(2000);
71 }
72
73 void lecturaRGBW(){
74     // Lectura de los fotodiodos con filtro rojo
75     digitalWrite(S2,LOW);
76     digitalWrite(S3,LOW);
77     frecuenciaRojo = pulseIn(salidaSensor, LOW);
78
79     // Lectura de los fotodiodos con filtro verde
80     digitalWrite(S2,HIGH);
81     digitalWrite(S3,HIGH);
```

```

82 frecuenciaVerde = pulseIn(salidaSensor, LOW);
83
84 // Lectura de los fotodiodos con filtro azul
85 digitalWrite(S2, LOW);
86 digitalWrite(S3, HIGH);
87 frecuenciaAzul = pulseIn(salidaSensor, LOW);
88
89 // Lectura de los fotodiodos sin filtro
90 digitalWrite(S2, HIGH);
91 digitalWrite(S3, LOW);
92 frecuenciaBlanca = pulseIn(salidaSensor, LOW);
93 }

```

### A.3 Circuito impreso

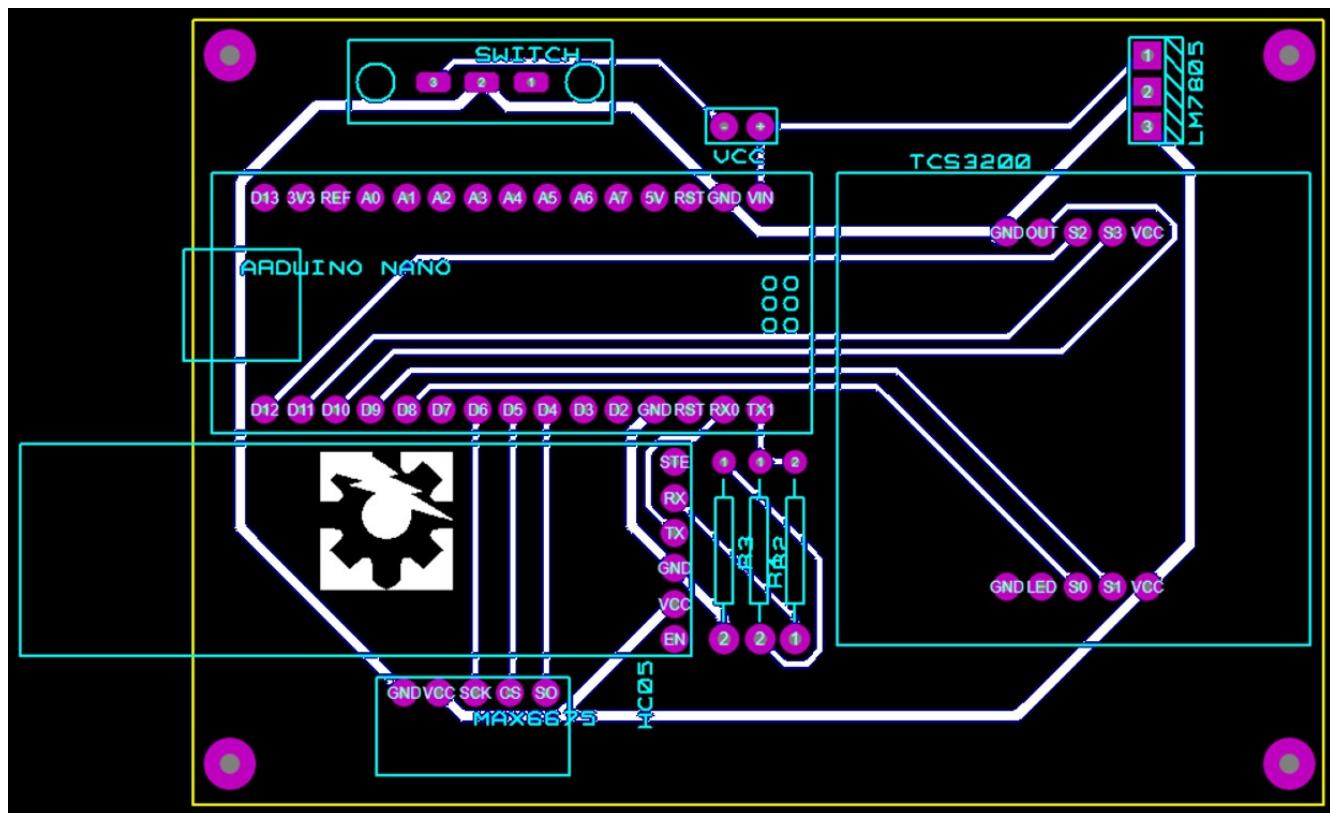


Figura 18. Diseño de circuito impreso.

#### A.4 Programación en bloques de la app (Thermy)

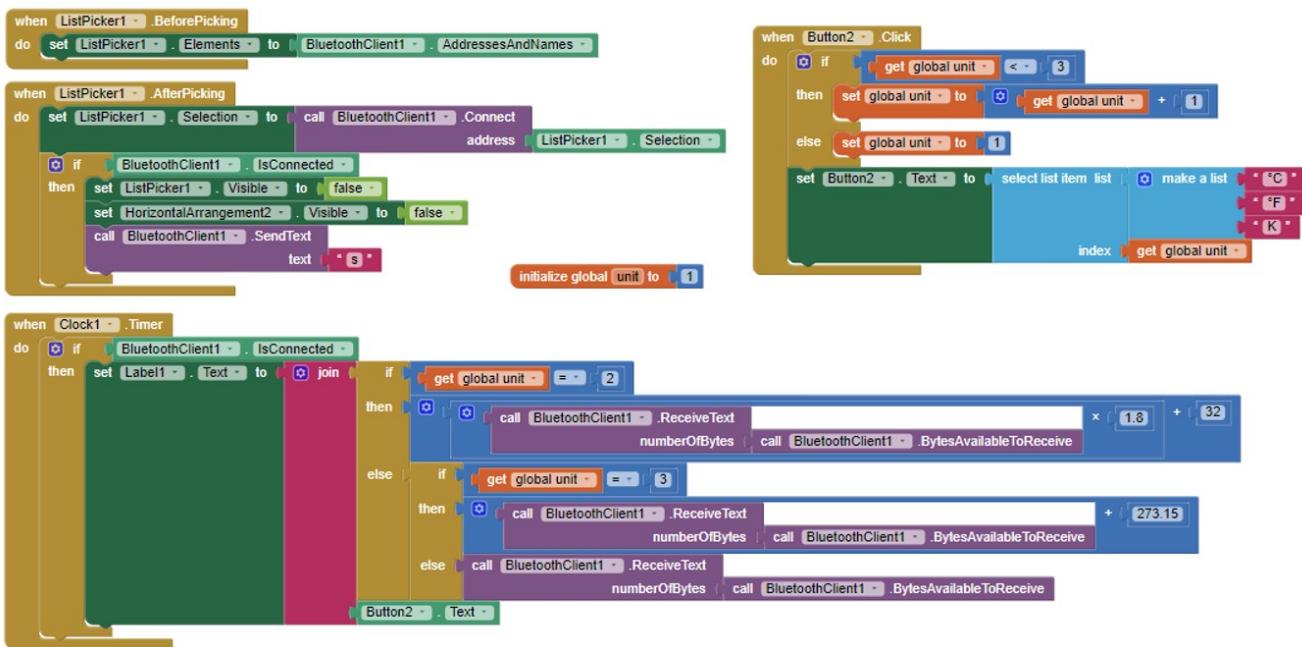


Figura 19. Programación en bloques de la app.

#### A.5 operacion.ino

```

1 // 
2 // Cableado de TCS3200 a Arduino
3 //
4 #define S0 8
5 #define S1 9
6 #define S2 12
7 #define S3 11
8 #define salidaSensor 10
9
10 //Se definen las constantes del modelo
11 #define a 1592.94236882059
12 #define b 1.00094211544372
13 #define c -0.295805520537105
14
15 // Para guardar las frecuencias de los fotodiodos
16 int frecuenciaBlanca = 0;
17
18 void setup() {
19     // Definiendo las Salidas
20     pinMode(S0, OUTPUT);
21     pinMode(S1, OUTPUT);
22     pinMode(S2, OUTPUT);
23     pinMode(S3, OUTPUT);
24
25     // Definiendo salidaSensor como entrada
26     pinMode(salidaSensor, INPUT);
27 }
```

```
28 // configurando la escala de frecuencia del sensor a 100%
29 digitalWrite(S0,HIGH);
30 digitalWrite(S1,HIGH);
31
32 // Lectura de los fotodiodos sin filtro
33 digitalWrite(S2,HIGH);
34 digitalWrite(S3,LOW);
35
36 // Iniciar la comunicacion serial
37 Serial.begin(9600);
38 }
39
40 void loop() {
41 if(Serial.available())//si se est recibiendo una instruccion
42 {
43     //Se lee el caracter de entrada
44     char op=Serial.read();
45     if(op == 's'){
46         while(true){
47             principal();
48         }
49     }
50 }
51
52 }
53
54 void principal(){
55
56     frecuenciaBlanca = pulseIn(salidaSensor, LOW);
57
58     Serial.print(temperaturaC(frecuenciaBlanca));
59
60     delay(1000);
61 }
62
63 float temperaturaC(int f){
64     return a*pow(b,f)*pow(f,c) - 273.15 ;
65 }
```