

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS  
SUPERIORES DE OCCIDENTE



**Proyecto Final: Monitoreo de Cultivos**

por

César Villarreal Hernández, ie707560

Gustavo Alejandro Sánchez Arvizu, ie716000

Instrumentación Electrónica

Dr. Luís Enrique González Jiménez

Lunes 18 de mayo de 2020

## Índice

<b>I. Introducción.....</b>	<b>3</b>
<b>II. Planteamiento del problema.....</b>	<b>3</b>
<b>III. Marco teórico.....</b>	<b>4</b>
<b>IV. Descripción de la propuesta de solución.....</b>	<b>6</b>
<b>V. Microcontrolador y su IDE .....</b>	<b>17</b>
<b>VI. PCB.....</b>	<b>18</b>
<b>VII. GUI .....</b>	<b>18</b>
<b>VIII. Diagrama a bloques de la solución completa.....</b>	<b>22</b>
<b>IX. Análisis y desarrollo teórico .....</b>	<b>26</b>
<b>X. Resultados Experimentales.....</b>	<b>27</b>
<b>XI. Conclusiones .....</b>	<b>32</b>
<b>XII. Repositorio del proyecto .....</b>	<b>33</b>
<b>XIII. Hojas de datos (data sheets).....</b>	<b>33</b>
<b>XIV. Referencias.....</b>	<b>33</b>

## I. Introducción

Durante todo el curso se ha llevado a cabo diferentes prácticas para la buena elaboración de un proyecto final, sin embargo, debido a la contingencia sanitaria, el proyecto tomó otra dirección poco esperada. A pesar de esto, unimos esfuerzos con las plataformas y programas digitales para modelar y simular las respuestas de sensores que nos servirán para elaborar nuestra propuesta de proyecto, que es la implementación de un huerto casero de frutos de jitomates. Como próximos ingenieros nuestra misión en el campo laboral y deber con el mundo es de transmitir correctamente información que nos proporciona nuestra realidad, es por eso que optamos por el monitoreo de variables que afectan la producción agrícola, en este caso desde un consumo personal.

En este documento encontrarás el procedimiento que seguimos para modelar digitalmente un sistema que es capaz de monitorear el estado de una planta de tomate, desde la elección de los sensores hasta su respuesta en tiempo al aplicarles distintas entradas.

## II. Planteamiento del problema

La agricultura de precisión es una práctica agrícola enfocada a aumentar la productividad y reducir el uso de agua de las cosechas. Actualmente, existen comunidades en Jalisco que producen su propia cosecha para consumo propio. Un ejemplo de esta situación es la de [Instituto Omatl](#), una comunidad de personas que viven bajo el sustento de las cosechas provenientes de su propio huerto urbano. El problema principal al que se enfrentan las cosechas en los huertos urbanos es la productividad; esta se ve afectada dado que la planta depende de temperatura del aire y la humedad del ambiente para su crecimiento óptimo.

Nuestro proyecto se enfoca principalmente en mejorar la eficiencia de la producción de un cultivo por medio de proveer al usuario de información que puede ser relevante para su cultivo. El sistema propuesto se encuentra compuesto por un sensor de humedad del aire, un sensor de humedad relativa, un sensor de flujo, y una bomba pequeña de agua. A partir de la información obtenida de temperatura y humedad es posible obtener el déficit de presión de vapor (VPD), la cual es una medida de la diferencia entre la presión ejercida por la humedad presente en el aire y la presión en saturación; una medida de que tanto transpiran las plantas. “La razón de transpiración impacta directamente en la absorción de nutrientes, translocación, y crecimiento. A medida que las plantas pierden agua a través de sus hojas, absorben agua a través de sus raíces. Todos los nutrientes se unen a la corriente de transpiración para que puedan depositarse donde se necesitan” (Growell, 2019). Los agricultores utilizan el VPD para incrementar la productividad de sus cultivos, optimizar la absorción de nutrientes, reducir las pérdidas por pudrimiento, y prevenir el estrés de las plantas. A partir de la información obtenida, el usuario puede tomar la decisión de modificar el déficit de presión de vapor al modificar la temperatura y la humedad de manera externa; ya sea utilizando un calentador o un aire acondicionado para cambiar la temperatura del aire, y un humidificador para modificar la humedad del ambiente. Es posible considerar la implementación de un sistema de control automático. Sin embargo, en este proyecto se considera que el usuario es responsable de modificar las variables externas para el beneficio de su cultivo. Además de los sensores de humedad y temperatura, se considera el uso de un sensor de flujo para ahorrar

recursos de agua para el riego del cultivo. Este proyecto se encuentra centrado en un solo tipo de cultivo: tomates (jitomates).

### III. Marco teórico

#### ➤ Huerto Urbano

- Un huerto urbano es un espacio determinado con uso específico para plantación y desarrollo de plantas o hierbas. Etas huertos tienen diferentes formas y variaciones y se les puede encontrar en los camellones de las calles, paredes y en propiedad privada, como las casas.

#### ➤ Temperatura

- La temperatura es una variable física que modela el valor térmico de un cuerpo y se puede modelar con la siguiente relación:

$$T = k \cdot E_c$$

Donde T es la temperatura, k es una constante universal para todo el mundo y Ec representa la energía cinética media de las moléculas. (Fernández, s.f.)

- “Las temperaturas en las cuales ocurren la mayoría de los procesos fisiológicos de la plantas se encuentran en el rango de 0 °C a 40 °C” (F.W. Went, 1953, p.347).
- “La temperatura óptima para el crecimiento de las raíces del tomate se encontró que es de 30 °C.
- “La temperatura optima durante la noche para la elongación del tallo de las plantas de tomate es cuando la planta está sometida a 18° C, pero las zonas de crecimiento se elongan más rápido a los 26 °C. Estos datos muestran que las temperaturas óptimas para el crecimiento de las partes de la planta de tomate, en general se encuentra por encima de los 25 °C” (F.W. Went, 1953, p.348).

#### ➤ Humedad Relativa

- La humedad relativa es la forma más común de expresar la humedad. Nos indica el porcentaje de vapor de agua que se encuentra en el aire (Perry, 2017), se puede calcular de las siguiente manera:

$$H. R. = \frac{\text{densidad de vapor real}}{\text{densidad de vapor saturación}} \times 100$$

Se manejan densidad, por ende, el uso más común de unidades es de  $g/m^3$

#### ➤ Riego

- Para el riego es muy importante conocer cuanta cantidad de agua se le proporciona, para esto se recomienda un sistema de riego por goteo, puesto en la etapa de floración es cuando la planta está en su punto máximo de necesidad hídrica.

#### ➤ Déficit de presión de vapor (VPD)

- El déficit de presión de vapor se puede obtener a partir de la temperatura del aire y la humedad del ambiente.
- “VPD significa déficit de presión de vapor. Para comprender la VPD, primero debemos comprender el concepto de presión de vapor y cómo se relaciona con la

humedad. La mayoría de nosotros estamos familiarizados con el concepto de humedad relativa. Es la relación entre el agua real en el aire y el punto de saturación teórico a la temperatura actual del aire, expresada como un porcentaje” (Argus, 2009, p.6).

- De acuerdo a la tesis escrita por R. Ramin, J. W. Jones, y K. Thorp, la cual trata sobre la temperatura, humedad, y VPD óptimo para el control de invernaderos, establece que el déficit de presión de vapor puede ser expresado por:

$$VPD = e^{6.41+0.0727T-3 \times 10^{-4}T^2+1.18 \times 10^{-6}T^3-3.863 \times 10^{-9}T^4} \left(1 - \frac{RH}{100}\right)$$

donde  $T$  es la temperatura del aire y  $RH$  es la humedad relativa del ambiente

- “Cuando el VPD está muy alto la razón de evaporación de las hojas puede exceder el suplemento de agua en las raíces. Esto puede causar que la estoma se cierre, y la fotosíntesis se vuelve más lenta o se detiene. Una vez que la estoma se cierra, las hojas se encuentran en riesgo de una lesión por alta temperatura dado a que el enfriamiento evaporativo es reducido debido a la falta de agua a evaporar” (Argus, 2009, p.10).
- “Cuando el VPD está muy bajo las plantas no son capaces de evaporar suficiente agua para permitir el transporte de minerales a las células de la planta en crecimiento, aun cuando la estoma se encuentre abierta” (Argus, 2009, p.10).
- La siguiente tabla representa los:

Fig. 1: Cálculos de VPD en kilo pascal (kPa) para diferentes valores de temperatura y humedad

		Relative Humidity													
°C	°F	100%	95%	90%	85%	80%	75%	70%	65%	60%	55%	50%	45%	40%	35%
15	59	0.0	0.8	1.7	2.5	3.4	4.2	5.1	5.9	6.8	7.6	8.5	9.4	10.2	11.1
16	60.8	0.0	0.9	1.8	2.8	3.7	4.6	5.5	6.4	7.3	8.2	9.1	10.0	10.9	11.8
17	62.6	0.0	1.0	2.0	2.9	3.9	4.9	5.8	6.8	7.8	8.8	9.7	10.6	11.6	12.6
18	64.4	0.0	1.0	2.0	3.1	4.1	5.1	6.2	7.2	8.2	9.3	10.3	11.3	12.4	13.4
19	66.2	0.0	1.1	2.2	3.3	4.4	5.5	6.6	7.7	8.8	9.9	11.0	12.1	13.2	14.3
20	68	0.0	1.2	2.4	3.5	4.7	5.9	7.0	8.2	9.4	10.6	11.7	12.8	14.0	15.2
21	69.8	0.0	1.2	2.4	3.7	4.9	6.2	7.4	8.6	9.9	11.1	12.4	13.7	14.9	16.1
22	71.6	0.0	1.3	2.6	3.9	5.3	6.6	7.9	9.2	10.5	11.9	13.2	14.5	15.8	17.2
23	73.4	0.0	1.4	2.8	4.2	5.6	7.0	8.5	9.9	11.3	12.7	14.1	15.4	16.8	18.2
24	75.2	0.0	1.5	3.0	4.5	5.9	7.4	8.9	10.4	11.9	13.4	14.9	16.4	17.9	19.4
25	77	0.0	1.6	3.2	4.8	6.4	8.0	9.5	11.1	12.7	14.3	15.9	17.4	19.0	20.5
26	78.8	0.0	1.7	3.4	5.1	6.7	8.4	10.1	11.8	13.4	15.1	16.8	18.4	20.1	21.8
27	80.6	0.0	1.8	3.5	5.3	7.1	8.9	10.7	12.4	14.2	16.0	17.8	19.6	21.3	23.1
28	82.4	0.0	1.9	3.8	5.7	7.6	9.5	11.4	13.3	15.1	17.0	18.9	20.7	22.6	24.5
29	84.2	0.0	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0	18.0	20.0	22.1	24.1	26.1
30	86	0.0	2.1	4.2	6.4	8.5	10.6	12.7	14.8	17.0	19.1	21.2	23.3	25.4	27.5
31	87.8	0.0	2.2	4.5	6.7	9.0	11.2	13.4	15.7	17.9	20.2	22.4	24.6	26.9	29.1
32	89.6	0.0	2.4	4.7	7.1	9.5	11.9	14.2	16.6	19.0	21.3	23.7	26.1	28.4	30.8
33	91.4	0.0	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	17.6	20.1	22.6	25.1	27.6	30.1	32.6
34	93.2	0.0	2.7	5.3	8.0	10.6	13.3	15.9	18.6	21.2	23.9	26.5	29.2	31.8	34.5
35	95	0.0	2.8	5.6	8.4	11.2	14.0	16.8	19.6	22.4	25.2	28.0	30.8	33.6	36.4

- “Para prevenir pérdida de producto de un fruto de tamaño pequeño y la incidencia de enfermedades por hongos, el VPD debe mantenerse por encima de los 0.5 kPa; pero para prevenir pérdidas por la calidad de la fruta, el VPD debe mantenerse por debajo de los 0.7 kPa. La polinación propia de los tomates requiere un VPD de 0.2 a 1.0 kPa” (M. Trigui & S.F Barrington & L.Gauthier, 1999, p.1). A partir de los datos anteriores, podemos concluir que es necesario tener diferentes valores de VPD en diferentes etapas del crecimiento del tomate.

#### IV. Descripción de la propuesta de solución

##### a. Sensores

###### ➤ Sensor de temperatura

- Modelo del sensor:

LM35

- Variable a medir:

Temperatura del ambiente

- ¿Por qué se considera importante medir la temperatura del aire?

La temperatura es esencial para calcular el Déficit de presión de vapor y obtener una medición clara sobre la situación de nuestra planta y un posible efecto que la temperatura le puede causar.

- Características Estáticas:

- Precisión

$$\text{Precisión} = \pm 0.6^{\circ}\text{C}$$

- Resolución

$$\text{Resolución} = 10\text{ mV}$$

- Rango de medición

$$\text{Rango de entrada} = [2, 150]^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Rango de salida} = [0.02, 1.5]\text{ V}$$

- Escala

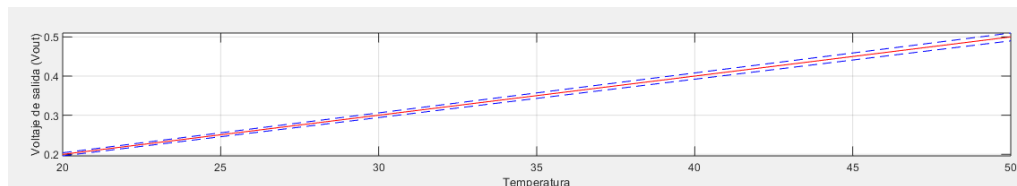
Solo una escala (mV)

- Linealidad

Este sensor tiene una salida lineal en su estado estable.

$$V_{out} = 10 \frac{\text{mV}}{^{\circ}\text{C}} T(t)$$

Fig. 2: Respuesta del sensor (linealidad) ante una entrada de variable física.



- Características Dinámicas:

- Modelo dinámico del sensor:

Pasa bajas de primer orden.

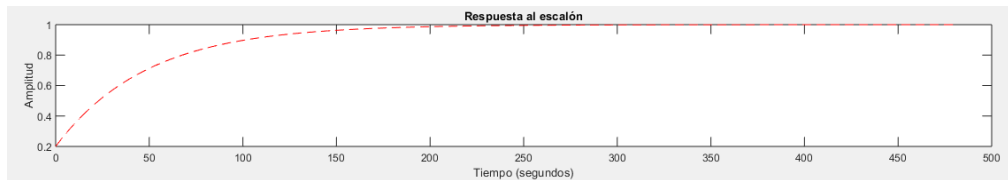
- Función de transferencia

$$\frac{V_o(s)}{T(s)} = \frac{0.0204937}{s + 0.0204937}$$

- Respuesta en el tiempo

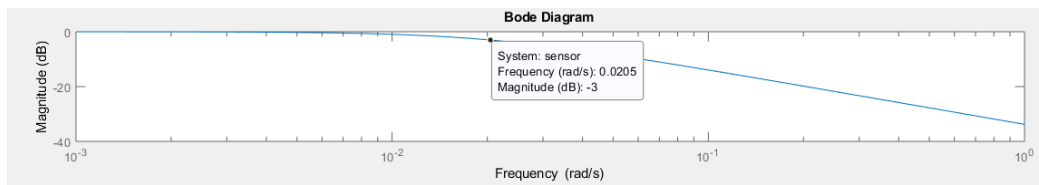
$$V_o(s) = 1 - 0.8e^{-0.0204937 t}$$

Fig. 3: Respuesta del sensor a través del tiempo



- Respuesta en frecuencia

Fig. 4: Respuesta en frecuencia (ST)



- Ancho de banda

$$bandwidth = [0, 0.02] \frac{rad}{s}, \quad bandwidth = [0, 0.0033] Hz$$

➤ Sensor de flujo de agua

- Modelo del sensor:

RS 256-225 Flow Sensor

- Variable a medir:

- Flujo de agua (caudal de agua)

- ¿Por qué se considera importante medir?

El flujo de agua varía durante ciertas etapas de crecimiento, lo cual es importante de monitorear pues es importante de abastecer con suficiente agua durante la floración pero no ahogar la planta durante el brote o recolección.

- Características Estáticas:

- Precisión

Sin datos

- Resolución

Sin datos

- Rango de medición

- Rango de entrada:  $Q = \left[1.33 \frac{cm^3}{s}, 2.0 \frac{cm^3}{s}\right]$
- Rango de salida:  $v_c = [0.17942 V, 0.272833 V]$

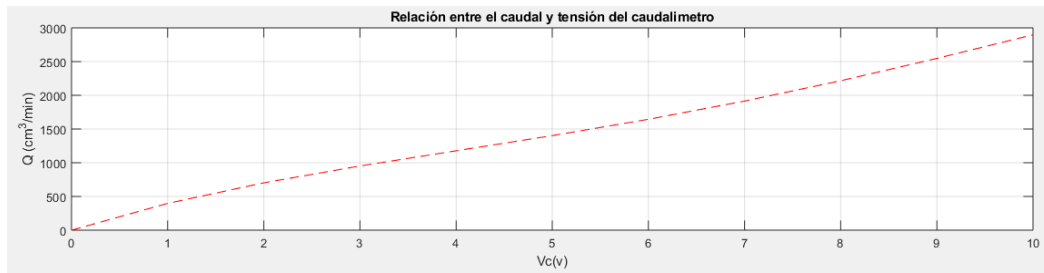
- Escala

$$\frac{cm^3}{s}$$

- Linealidad

A partir de los experimentos realizados en el documento “Control de Tanques Acoplados”, se obtuvo una expresión que relaciona el caudal y la tensión de salida del caudalímetro:

Fig. 5: Linealidad del sensor de flujo de agua



$$Q = -0.2789 v_c^4 + 7.9169 v_c^3 - 68.083 v_c^2 + 457.79 v_c$$

Dado a que conocemos el rango de salida de la bomba que se va a utilizar, el cual fue indicado en las especificaciones de su hoja de datos, podemos obtener los valores de voltajes a los que corresponde la salida del transductor.

$$Q = \left[80 \frac{cm^3}{hr}, 120 \frac{cm^3}{hr}\right] = \left[1.33 \frac{cm^3}{s}, 2.0 \frac{cm^3}{s}\right]$$

- Despejando  $v_c$  cuando  $Q = 80 \frac{cm^3}{hr}$ :

$$80 \frac{cm^3}{hr} = -0.2789 v_c^4 + 7.9169 v_c^3 - 68.083 v_c^2 + 457.79 v_c$$

$$v_c = 0.17942 V$$

- Despejando  $v_c$  cuando  $Q = 120 \frac{cm^3}{hr}$ :

$$120 \frac{cm^3}{hr} = -0.2789 v_c^4 + 7.9169 v_c^3 - 68.083 v_c^2 + 457.79 v_c$$

$$v_c = 0.272833 V$$

- Por lo tanto, el rango de voltaje de salida del transductor nos queda como:

$$v_c = [0.17942 V, 0.272833 V]$$



- Tomando en cuenta el punto de operación de nuestro caudalímetro, la recta que define a la tensión de salida y al caudal nos queda como:

$$v_c = k_c Q$$

Donde Q representa al caudal en  $\frac{cm^3}{s}$ , y  $v_c$  el voltaje de salida del transductor

$$k_{c\_min} = \frac{v_c}{Q} = \frac{0.17942 V}{1.33 \frac{cm^3}{s}} = 0.13490 \frac{V \cdot s}{cm^3}$$

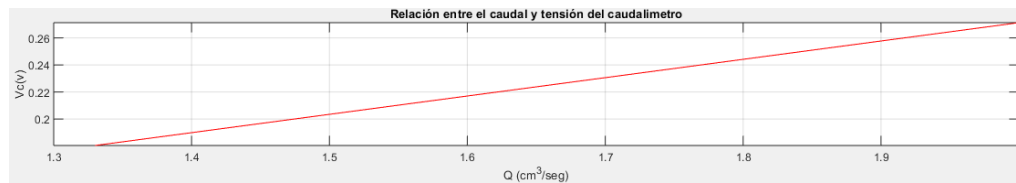
$$k_{c\_max} = \frac{v_c}{Q} = \frac{0.272833 V}{2.0 \frac{cm^3}{s}} = 0.13641 \frac{V \cdot s}{cm^3}$$

$$k_{c\_prom} = \frac{k_{c\_max} + k_{c\_min}}{2} = \frac{0.13490 + 0.13641}{2} \frac{V \cdot s}{cm^3}$$

$$k_{c\_prom} = 0.13565823 \frac{V \cdot s}{cm^3}$$

$$v_c = 0.13565823 \cdot Q$$

Fig. 6: Relación de volts por cada centímetro cúbico de líquido



- Características Dinámicas:
  - Modelo dinámico del sensor:  
Filtro pasa bajas de primer orden
  - Función de transferencia

Para obtener la función de transferencia del sensor, partimos del tiempo de rizo dado por el fabricante en la hoja de datos del sensor de flujo. Con este dato, aproxime la función de transferencia hasta que nos dio el tiempo de respuesta esperado. El tiempo de respuesta de este sensor de acuerdo a la hoja de datos es de 40 ns.

Fig. 7: Características dinámicas del sensor, obtenido de la hoja de datos

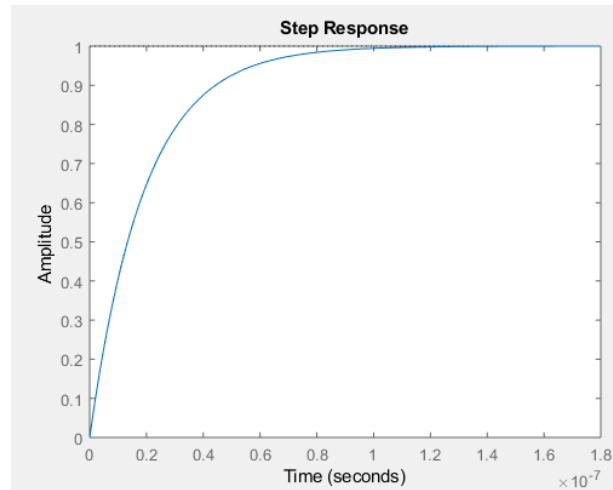
Characteristics	Symbol	Min	Typ.	Max.	Units
Supply voltage	Vcc	4.5	-	24	V
O/P saturation V.	Vcc(SAT)	-	150	400	MV
O/P leakage current	IOFF	-	0.05	10	μA
Supply current	Icc	-	4.7	8	mA
O/P rise time	Tr	-	0.04	2	μS
O/P fall time	Tf	-	0.18	2	μS

$$\frac{V_c(s)}{Q(s)} = \frac{5.1986e7}{s + 5.1986e7}$$

- Respuesta en el tiempo

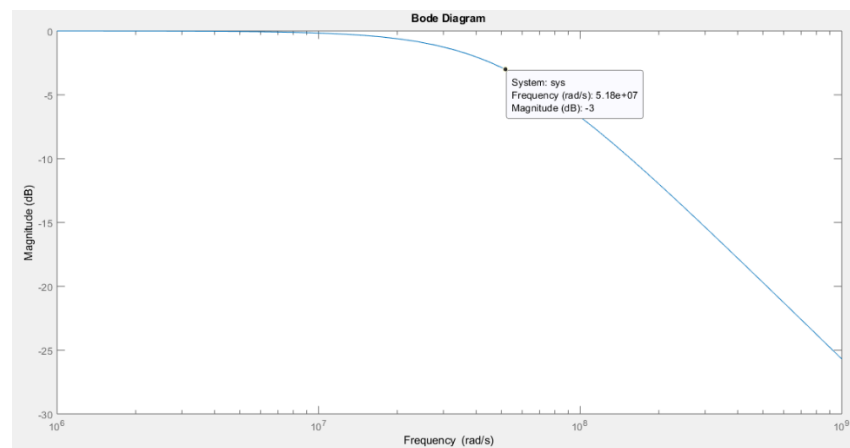
$$V_c(s) = 1 - 0.80e^{-40 \cdot 10^{-9} t}$$

Fig. 8: Respuesta a un impulso unitario



- Respuesta en frecuencia

Fig. 9: Respuesta en frecuencia del sensor de flujo de líquido

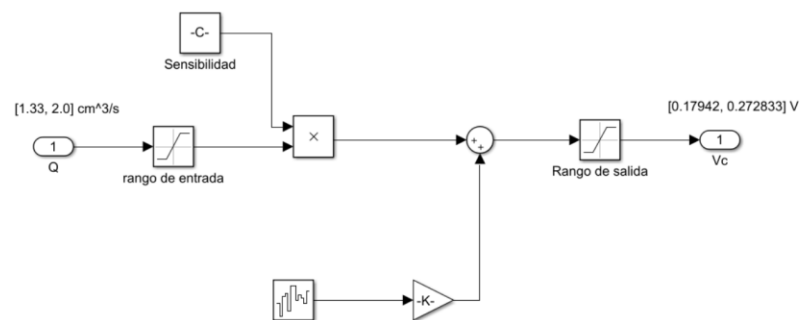


- Modelo Simulink

Fig. 10: Diagrama de bloques para modelo del sensor



Fig. 10: Cuerpo del subsistema (SFA)



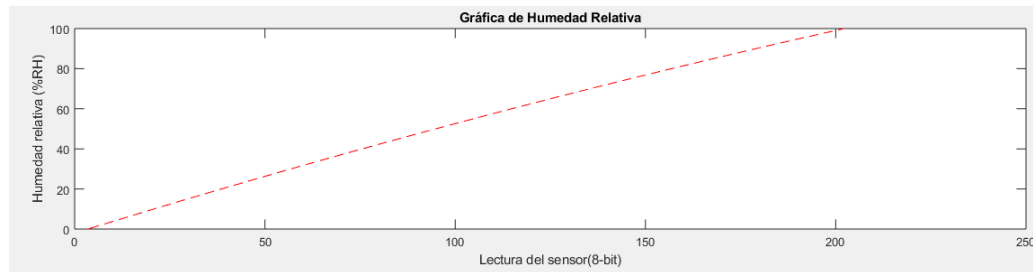
➤ Sensor de humedad relativa

- Modelo del sensor:  
SHT11
- Variable a medir:  
Humedad Relativa
- ¿Por qué se considera importante medir la humedad relativa?
- Características Estáticas:
  - Exactitud  
$$\text{Exactitud (típica)} = \pm 3.0 \%RH$$
  - Precisión  
$$\text{Precisión} = \pm 0.1 \%RH$$
  - Resolución

Parámetro	Valor mínimo	Valor típico	Valor máximo	Unidades
Resolución	0.4	0.05	0.05	% RH
	8	12	12	bit

- Rango de medición
  - *Rango de entrada:*  $[0, 100] \%RH$
  - *Rango de salida:*  $[4 - 202]$  (salida digital de 8-bit)
- Linealidad

Fig. 11: Linealidad del sensor de humedad



$$RH = -2.04680 + 0.5872 \cdot sensor_{read} - 4.0845 \times 10^{-4} \cdot sensor_{read}^2$$

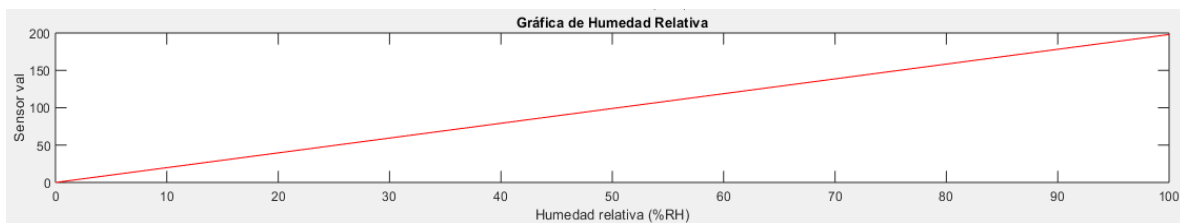
- De esta expresión obtenemos el rango de valores de salida:

$$100 = -2.04680 + 0.5872 \cdot sensor_{read} - 4.0845 \times 10^{-4} \cdot sensor_{read}^2$$

$$sensor_{read} = 202$$

$$0 = -2.04680 + 0.5872 \cdot sensor_{read} - 4.0845 \times 10^{-4} \cdot sensor_{read}^2$$

$$sensor_{read} = 4$$



$$Sensor\ read = 1.98 \frac{val}{\%RH} * \%RH$$

- No – linealidad:

$$no - linealidad = \ll 1 \%RH$$

- Sensibilidad

$$k = \frac{198 - 0}{100 - 0} = 1.98 \frac{val}{\%RH}$$

- Histéresis

$$Histéresis = \pm 1 \%RH$$

- Características Dinámicas

- Modelo dinámico del sensor:

Pasa bajas de primer orden.

- Función de transferencia

- Continua:

$$\frac{V_o(s)}{H(s)} = \frac{0.24607836}{s + 0.124282}$$

- Discreta:

$$\frac{V_o(z)}{H(z)} = \frac{0.24607836}{1 - e^{-0.124282 T} z^{-1}}$$

donde T es el periodo de muestreo

- Respuesta en el tiempo

Para obtener la función de transferencia es necesario considerar el tiempo de respuesta que da el fabricante en la hoja de datos que en este caso es el siguiente:

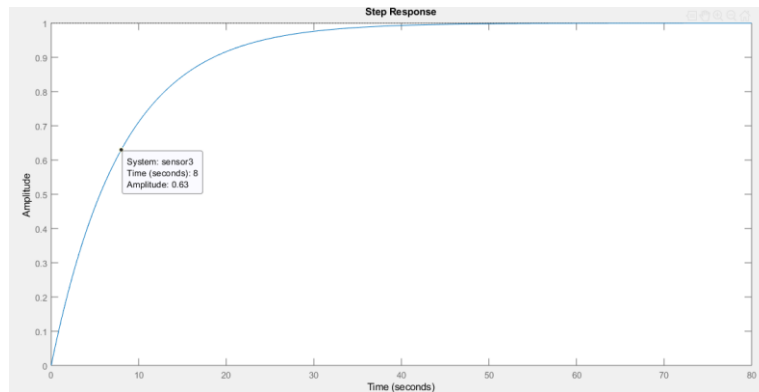
Fig. 13: Tiempo de respuesta, obtenido de la hoja de datos

Response time <sup>3</sup>	$\tau$ (63%)		8		s
----------------------------	--------------	--	---	--	---

El que hayan especificado a tau como el tiempo de respuesta del sensor, nos indica que estamos tratando con un filtro pasa bajas de primer orden. Por lo tanto, podemos expresar al voltaje de salida con respecto al tiempo como:

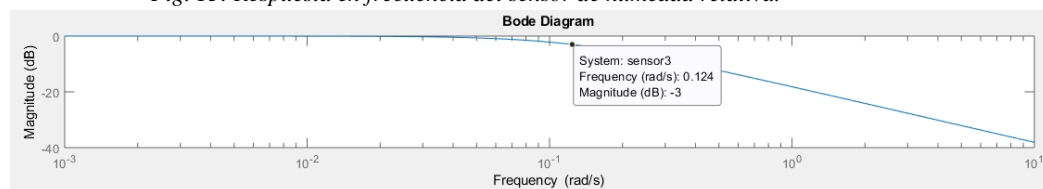
$$V_o(t) = 1 - e^{-0.124282 t}$$

Fig. 14: Respuesta del sensor a través del tiempo



- Respuesta en frecuencia

Fig. 15: Respuesta en frecuencia del sensor de humedad relativa.



- Ancho de banda

$$bandwidth = [0, 0.12] \frac{rad}{s}, \quad bandwidth = [0, 0.0197] Hz$$

- Modelo Simulink

Fig. 16: Diagrama de bloques SHR

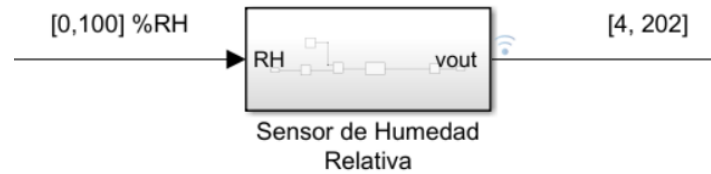
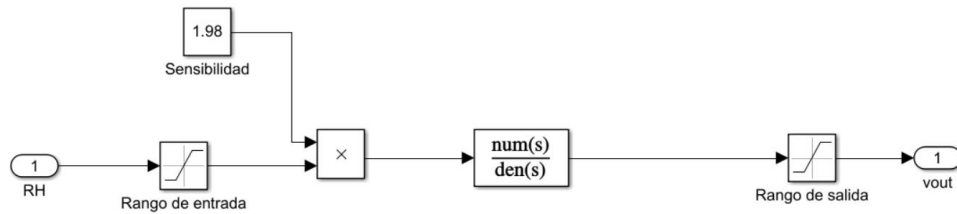


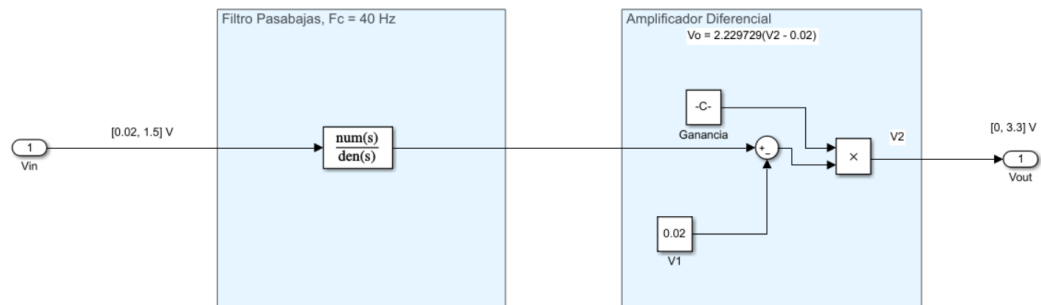
Fig. 17: Cuerpo del modelo de sensor de humedad SHR



## b. Acondicionamiento

- Acondicionamiento para el sensor de temperatura

Fig. 18: Bloque representativo para el acondicionamiento del sensor



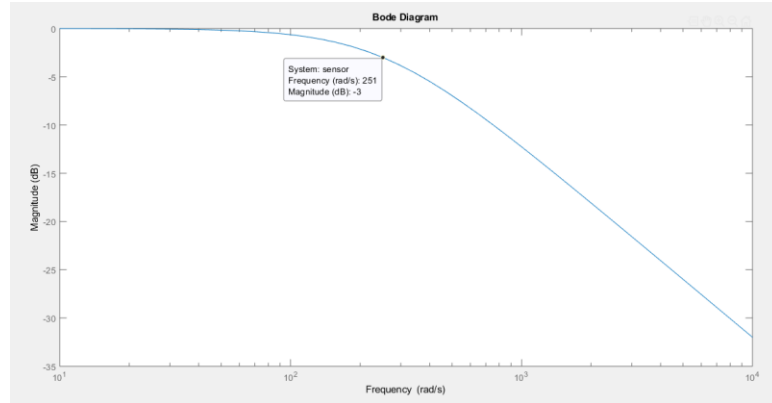
La primera etapa de acondicionamiento analógico consiste en un filtro pasa bajas de primer orden con frecuencia de corte de 40 Hz. Por el motivo de que el ancho de banda de este sensor está limitado a menos de 1 Hz y a que el ancho de banda de la

señal de ruido es de 60 Hz, es posible aplicar un filtro pasa bajas para eliminar esta señal de ruido.

- Procedimiento:

$$H(s) = \frac{251.3274}{s + 251.3274}$$

Fig. 19: Magnitud y frecuencia de corte del FPB



La segunda etapa de acondicionamiento analógico consiste en un amplificador diferencial. El propósito de utilizar este circuito es el de cambiar el rango de voltaje de [0.2, 1.5] V a [0, 3.3] V para que el microcontrolador sea capaz de leer la información del sensor con una resolución óptima.

- Procedimiento:

Para convertir el rango de voltaje a [0.02, 1.5] V a [0, 3.3] V, debemos diseñar un amplificador diferencial.

$$v_o = G(V_2 - V_1)$$

La constante G está definida como:

$$G = \frac{3.3 \text{ V} - 0 \text{ V}}{1.5 \text{ V} - 0.02 \text{ V}} = 2.229729$$

Sustituyendo en la expresión anterior obtenemos:

$$v_o = 2.229729(V_2 - V_1)$$

Despejando para cero volts, sabiendo que  $V_1 = 0.02$

$$0 = 2.229729(V_2 - V_1)$$

$$0 = 2.229729(V_2 - 0.02)$$

$$V_2 = 0.02$$

$$v_o = 2.229729(V_2 - 0.02)$$

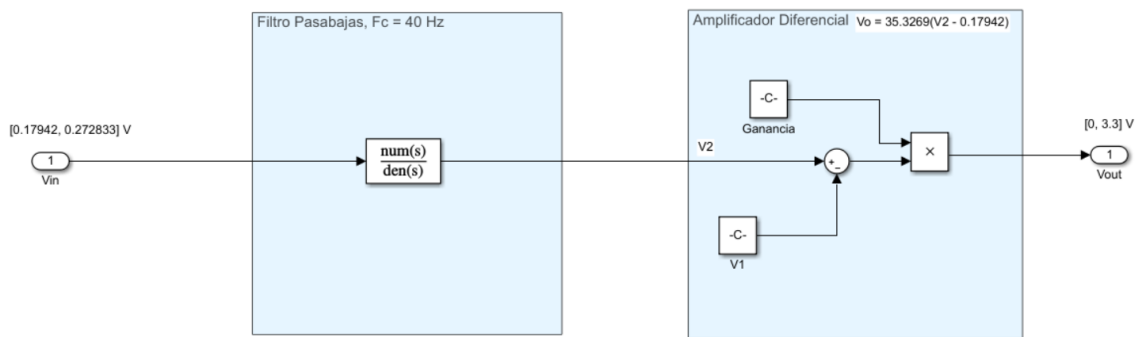
Sustituyendo los voltajes de entrada para el amplificador diferencial obtenemos:

$$v_o(0.02 V) = 2.229729(0.02 - 0.02) = 0 V$$

$$v_o(1.5 V) = 2.229729(1.5 V - 0.02) = 3.3V$$

- Acondicionamiento para el sensor de humedad relativa  
-Sin acondicionamiento
- Acondicionamiento para el sensor de flujo

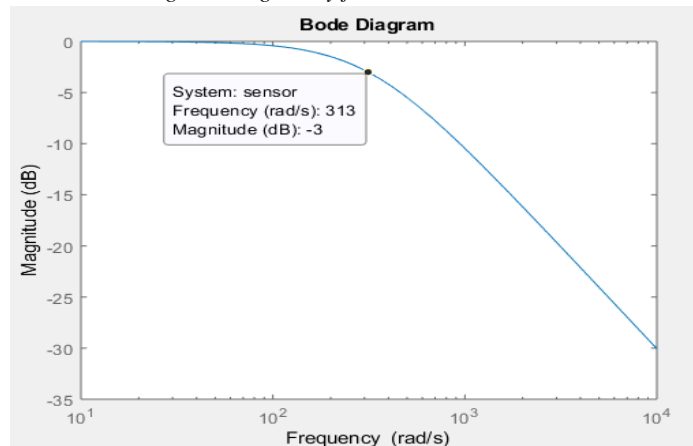
Fig. 20: Diagrama de bloques para acondicionamiento del sensor de flujo



La primera etapa de acondicionamiento analógico consiste en un filtro pasa bajas de primer orden con frecuencia de corte de 40 Hz. Por el motivo de que el ancho de banda de este sensor está limitado a menos de 1 Hz y a que el ancho de banda de la señal de ruido es de 60 Hz, es posible aplicar un filtro pasa bajas para eliminar esta señal de ruido.

$$H(s) = \frac{314.15}{s + 314.15}$$

Fig. 21: Magnitud y frecuencia de corte del FPB





La segunda etapa de acondicionamiento analógico consiste en un amplificador diferencial. El propósito de utilizar este circuito es el de cambiar el rango de voltaje de  $[0.17942, 0.272833] V$  a  $[0, 3.3] V$  para que el microcontrolador sea capaz de leer la información del sensor con una resolución óptima.

- Procedimiento:

Para convertir el rango de voltaje a  $[0.17942, 0.272833] V$  a  $[0, 3.3] V$ , debemos diseñar un amplificador diferencial.

$$v_o = G(V_2 - V_1)$$

La constante  $G$  está definida como:

$$G = \frac{3.3 V - 0 V}{0.27131646 V - 0.1804254459 V} = 36.30721951$$

Sustituyendo en la expresión anterior obtenemos:

$$v_o = 35.326988(V_2 - V_1)$$

Despejando para cero volts, sabiendo que  $V_1 = 0.2$

$$0 = 35.326988(V_2 - V_1)$$

$$0 = 35.326988(V_2 - 0.17942)$$

$$V_2 = 0.17942$$

$$v_o = 35.326988(V_2 - 0.17942)$$

Sustituyendo los voltajes de entrada para el amplificador diferencial obtenemos:

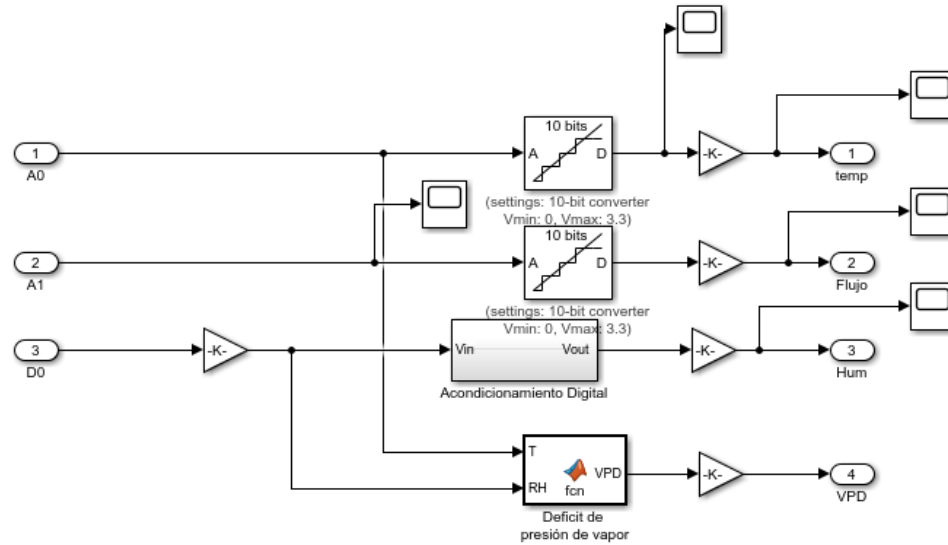
$$v_o(0.17942 V) =$$

$$35.326988(0.17942 - 0.17942) = 0 V$$

$$v_o(0.272833 V) = 35.326988(0.272833 V - 0.17942) = 3.3 V$$

## V. Microcontrolador y su IDE

*Fig. 22: Diagrama de bloques de operación del MCU*



Se utilizó un bloque ADC para digitalizar las señales obtenidas por los sensores, esto con el propósito de acercarse a la realidad del uso de un microcontrolador. EN este caso se realizó el proyecto pensando en la implementación de un ATMEGA328p. El cual tiene una resolución de 10 bits, según las especificaciones del fabricante.

*“The Atmel® ATmega328P features a 10-bit successive approximation ADC. The ADC is connected to an 8-channel analog multiplexer which allows eight single-ended voltage inputs constructed from the pins of Port A. The single-ended voltage inputs refer to 0V (GND).”*

## VI. PCB

El sistema se encuentra implementado únicamente en simulación. Por lo tanto, no se considera una tarjeta de circuito impreso para este proyecto.

## VII. GUI

Fig. 23: Pantalla principal de la GUI implementada



Fig. 24: Configuración de la simulación(escalones)

settings

Simulación de escalón

Temperatura: 150 °C

Humedad del aire: 100 %RH

Flujo de Agua: 2 cm³/s

Tiempo de Simulación: 480 segundos

Guardar

Regresar

Simulando

☒ Simulación de escalón

☐ Simulación de puntos

Fig. 25: Configuración de la simulación (vectores)

settings

Vectores

Temperatura: 33 34 35 36 °C

Humedad del aire: 70 67 63 58 %RH

Flujo de Agua: 1.5 1.5 1.5 1.5 cm³/s

Tiempo de Simulación: 20 minutos

Guardar

Regresar

☐ Simulación de escalón

☒ Simulación de puntos

Fig. 26: Gráfica del sensor de temperatura procesado por el microcontrolador.

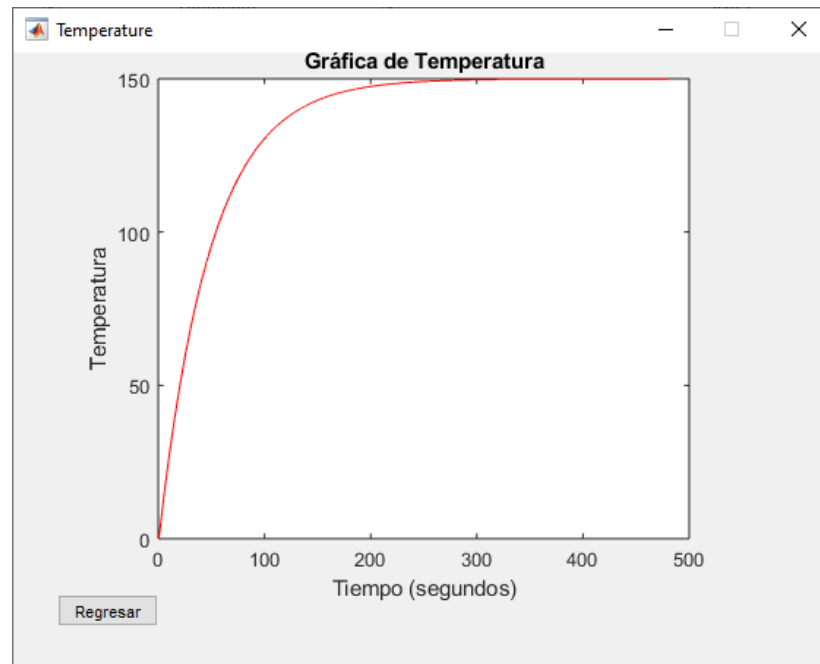


Fig. 27: Gráfica del escalón de humedad relativa procesado por el microcontrolador.

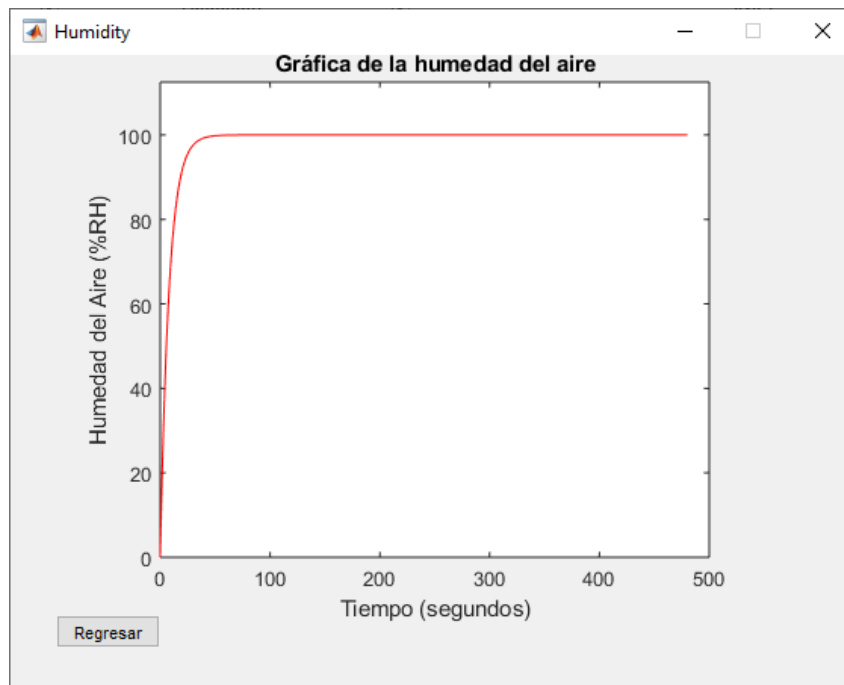


Fig. 28: Gráfica del escalón de caudal de agua procesado por el microcontrolador

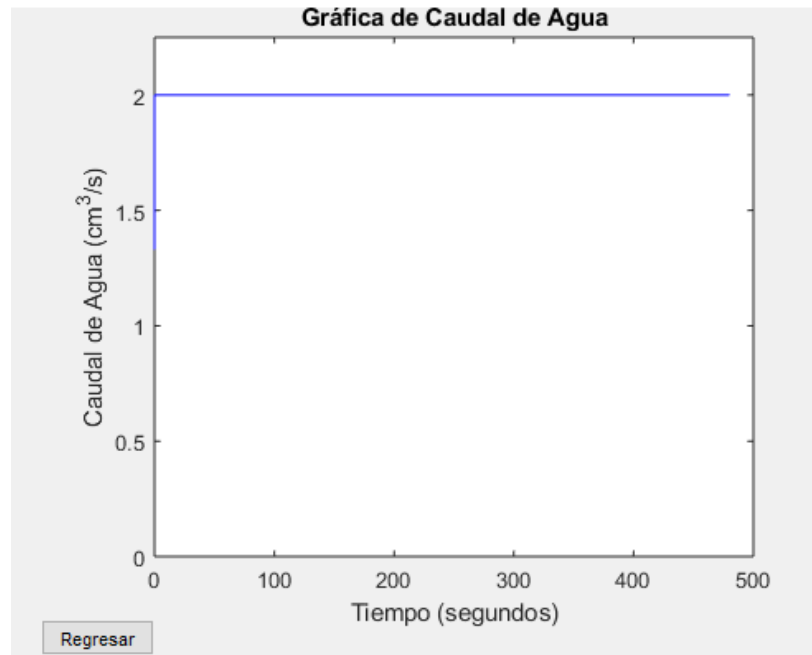
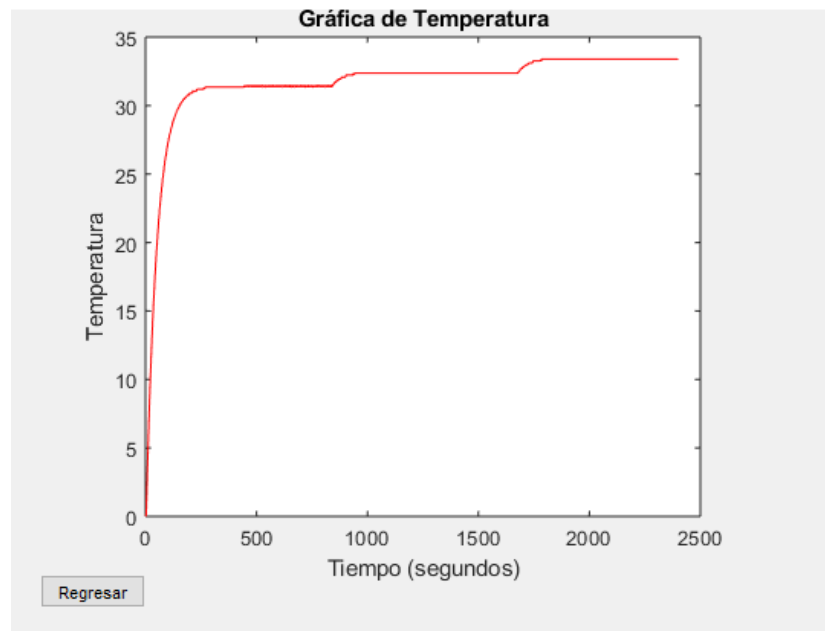


Fig. 29: Gráfica de la temperatura con cambios en el tiempo procesada por el microcontrolador.



## VIII. Diagrama a bloques de la solución completa

Fig. 30: Diagrama de bloques de la solución completa

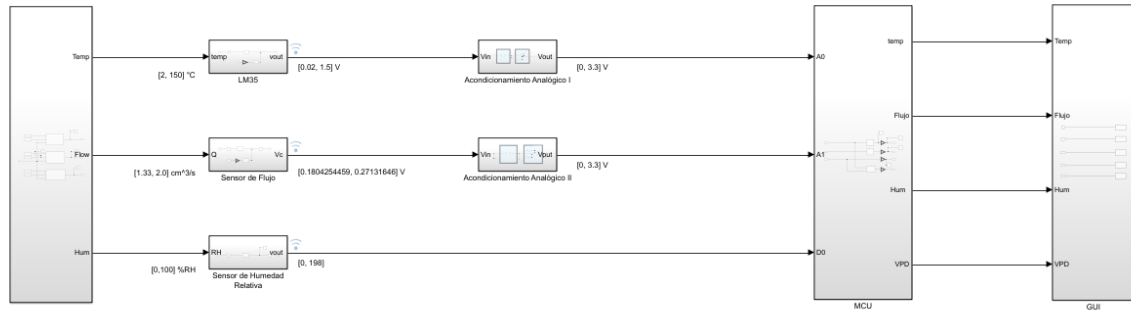


Fig. 31: Diagrama de bloques del sistema a monitorear

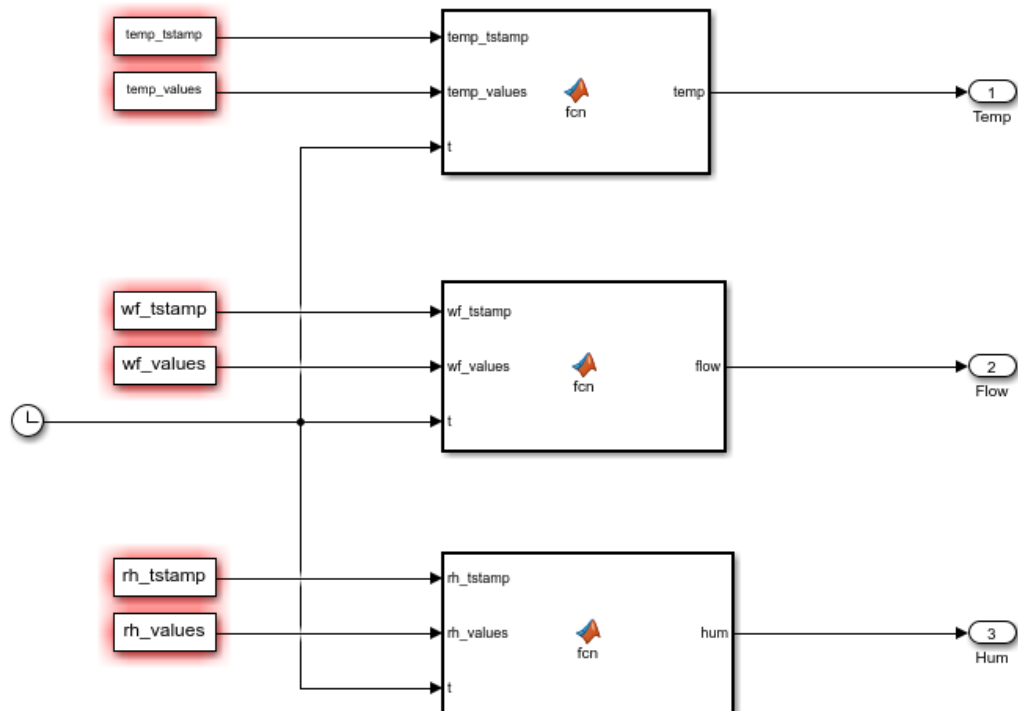


Fig. 32: Diagrama de bloques del sensor de temperatura.

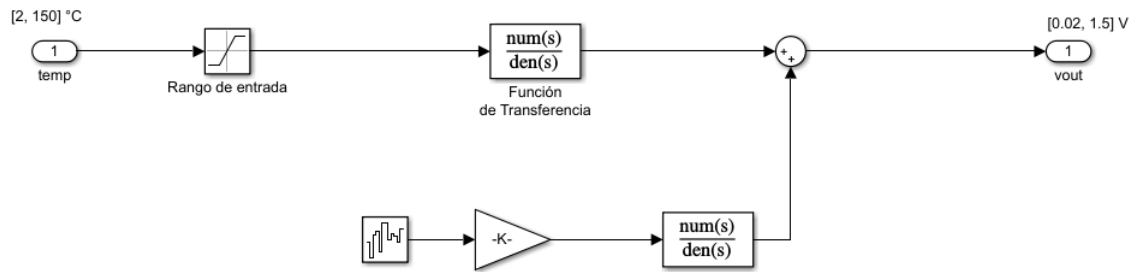


Fig. 33: Diagrama de bloques del sensor de flujo.

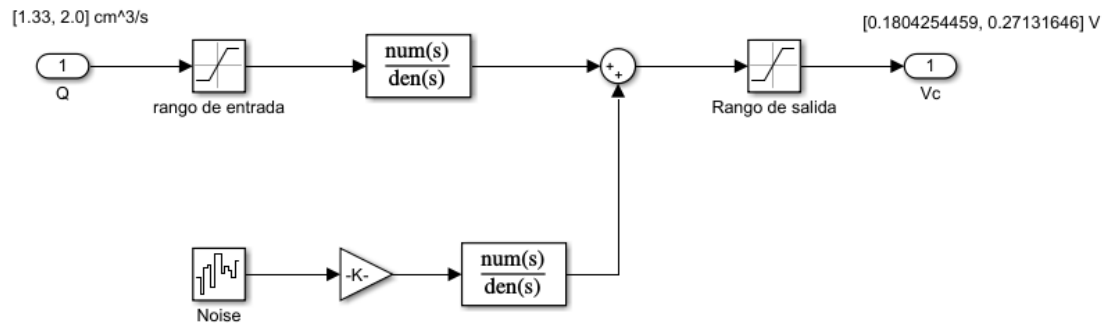


Fig. 34: Diagrama de bloques del sensor de humedad relativa.

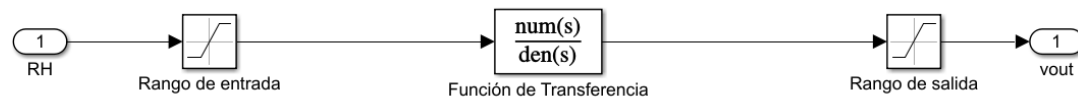




Fig. 35: Diagrama de bloques de la etapa de acondicionamiento del sensor de temperatura.

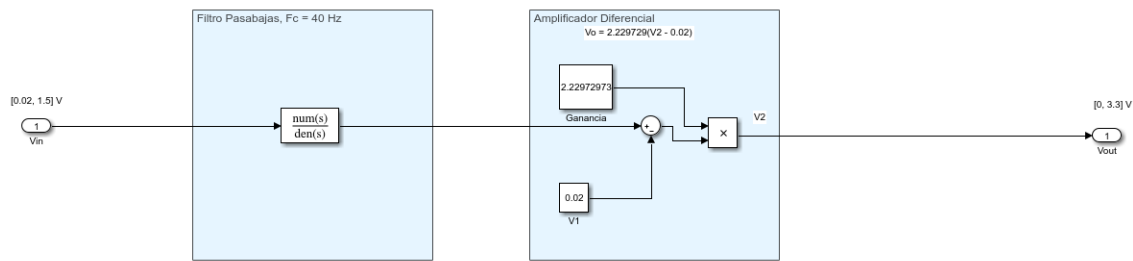


Fig. 36: Diagrama de bloques de la etapa de acondicionamiento del sensor de flujo.

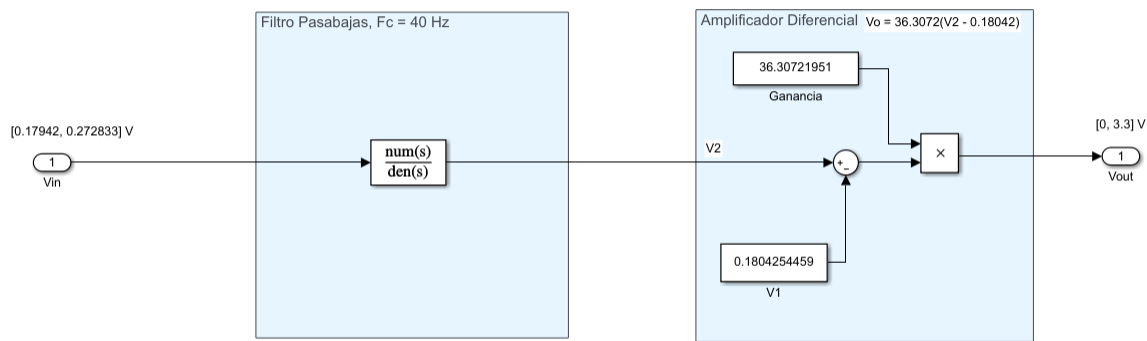
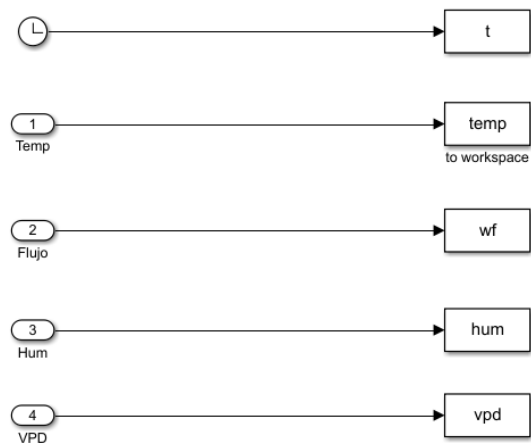


Fig. 37: Diagrama de bloques dentro del bloque de GUI.



## IX. Análisis y desarrollo teórico

A continuación, se presenta el análisis de las relaciones que guardan los sensores. Poniendo como ejemplo el sensor de Flujo de agua (Fig. 25). Donde vemos la escala en Volts ante un específica entrada de centímetros cúbicos por segundo.

Fig. 24: Análisis de datos y salidas del sensor de Temperatura

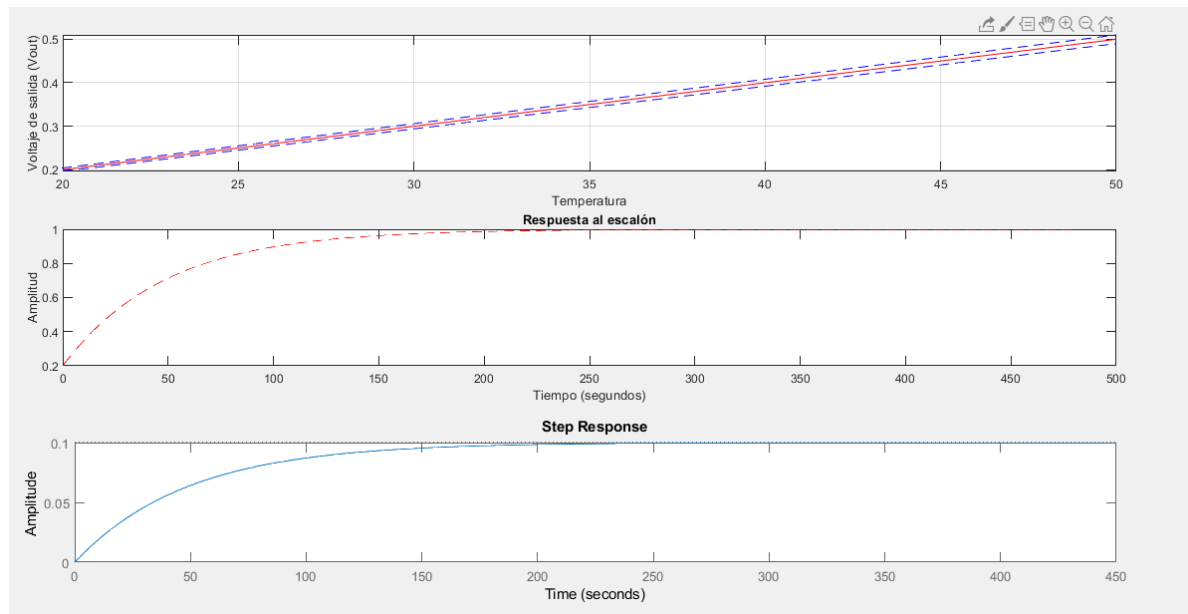


Fig. 26: Análisis de datos y salidas del sensor de Flujo

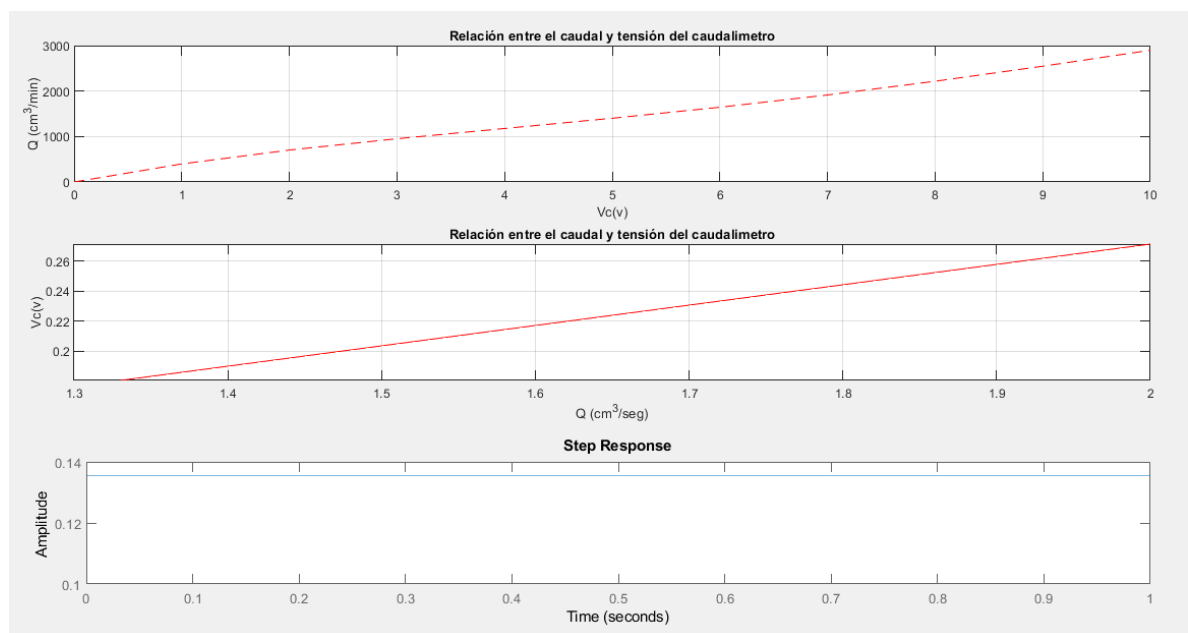
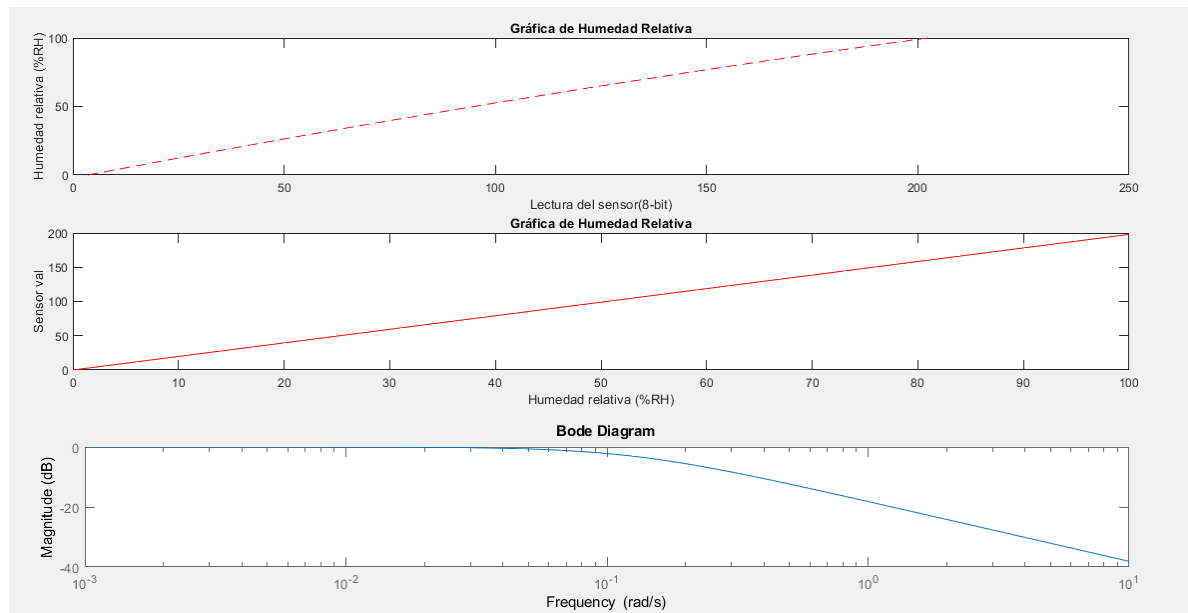


Fig. 27: Análisis de datos y salidas del sensor de Humedad

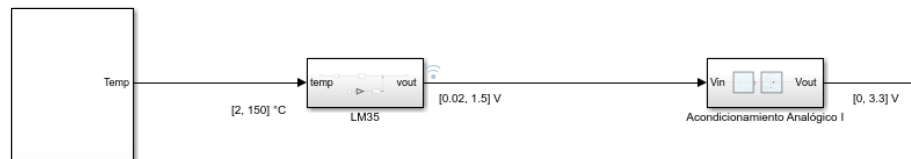


## X. Resultados Experimentales

### a. Descripción de las pruebas realizadas

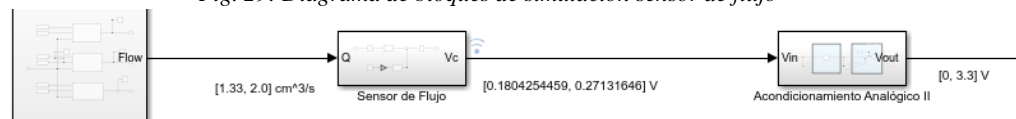
- Prueba #1: Simulación del sensor de temperatura y de su acondicionamiento.
- La primera prueba consistió en simular el sensor de temperatura LM35 ante una entrada escalón de 25 °C.

Fig. 28: Diagrama de bloques de simulación sensor temperatura



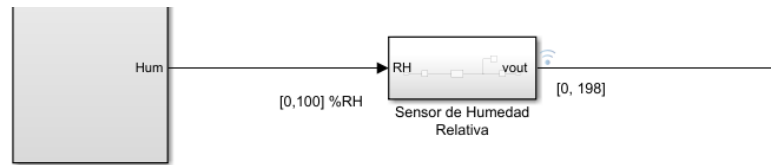
- Prueba #2: Simulación del sensor de flujo y de su acondicionamiento.
- La primera prueba consistió en simular el sensor de temperatura LM35 ante una entrada escalón de  $2.0 \frac{cm^3}{s}$ .

Fig. 29: Diagrama de bloques de simulación sensor de flujo



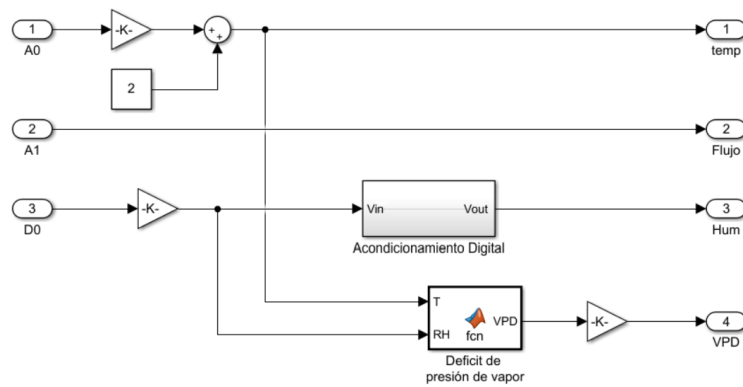
- Prueba #3: Simulación del sensor de humedad relativa SHT11:
- La primera prueba consistió en simular el sensor de temperatura SHT11 ante una entrada escalón de 70 %RH.

Fig. 30: Diagrama de bloques de simulación sensor de humedad



➤ Prueba #4: Simulación de la variable de déficit de presión de vapor (VPD):

Fig. 31: Diagrama de bloques de simulación variable VPD



b. Imágenes del desarrollo de las pruebas:

Fig. 32. Salida del sensor de temperatura ante una entrada escalón de 25 °C.

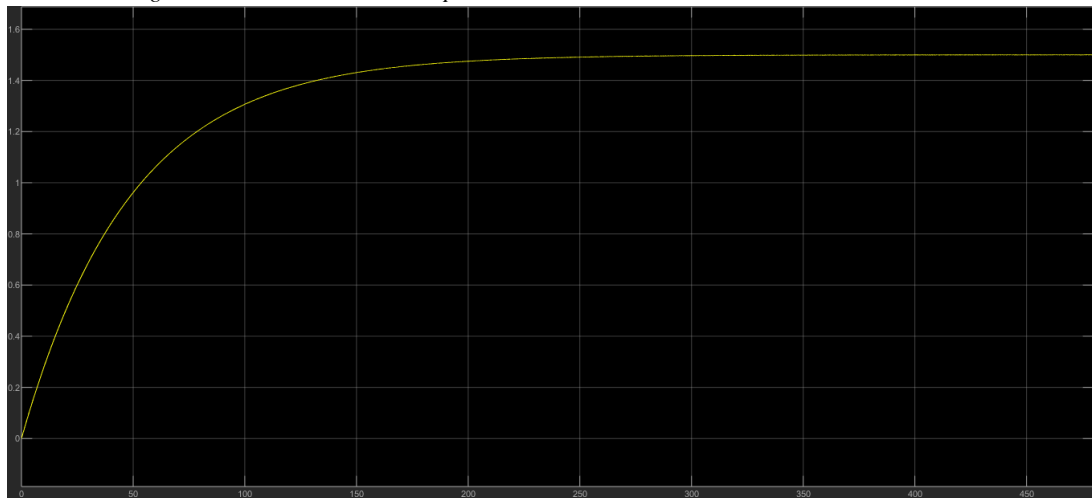


Fig. 33. Salida del sensor de temperatura ante una entrada escalón de 25 °C. (Vista con zoom)

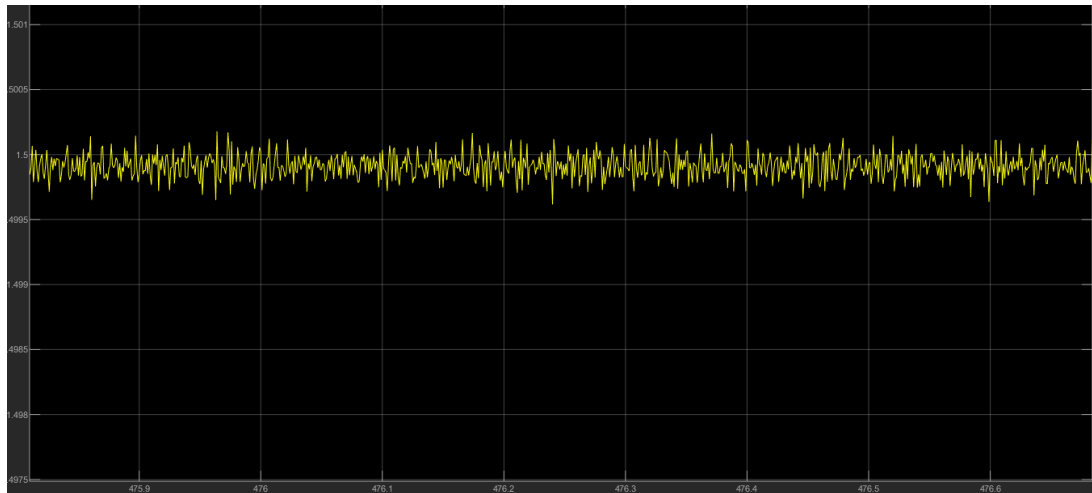


Fig. 34: Salida del bloque de acondicionamiento de temperatura ante una entrada escalón de 25°C.

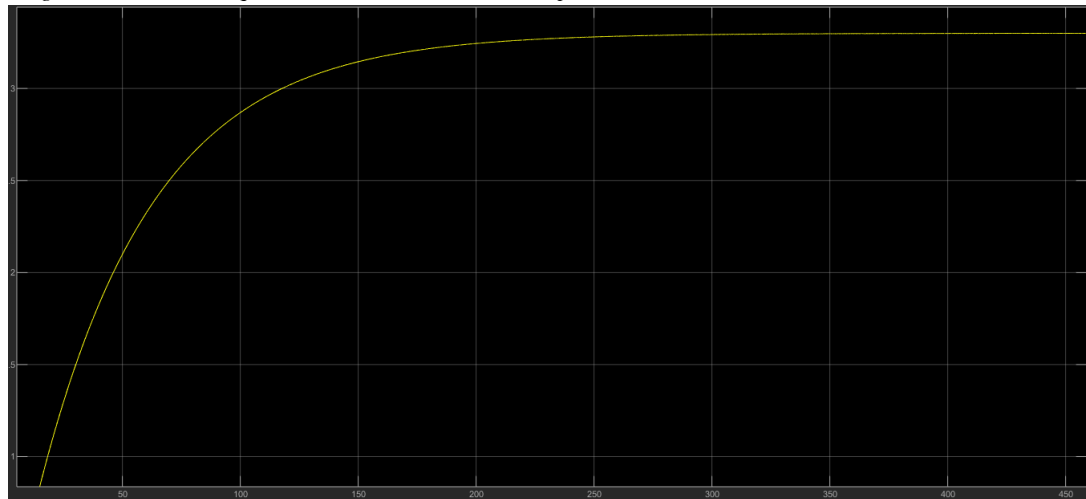


Fig. 35: Salida del bloque de acondicionamiento de temperatura ante una entrada escalón de 150°C. (Vista con zoom)

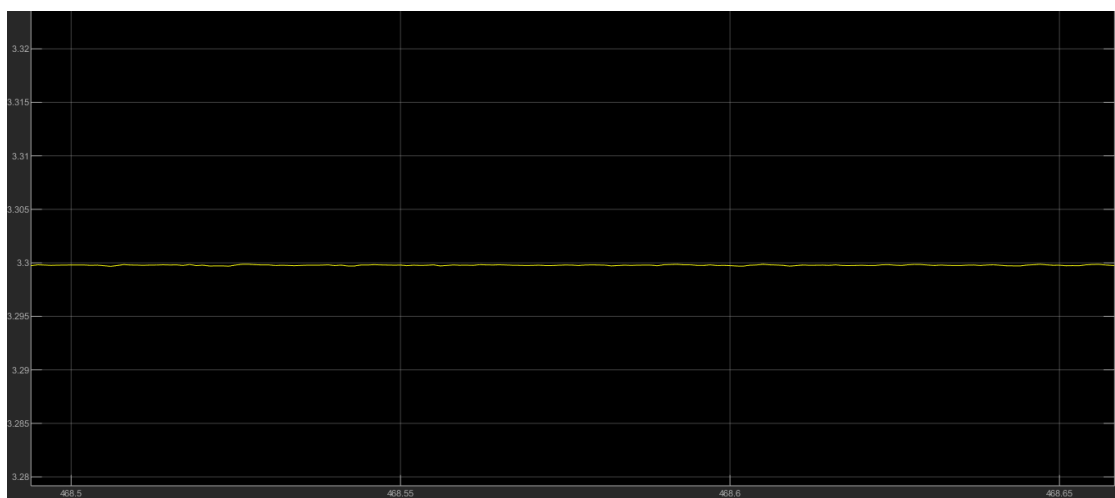


Fig.36: Salida del sensor de flujo ante una entrada escalón de  $2.0 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}}$ .

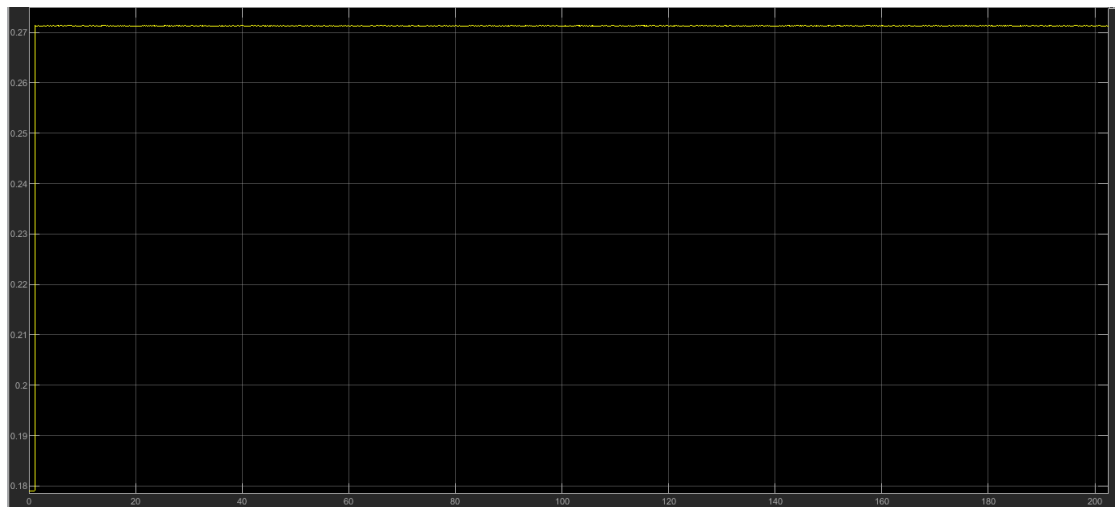


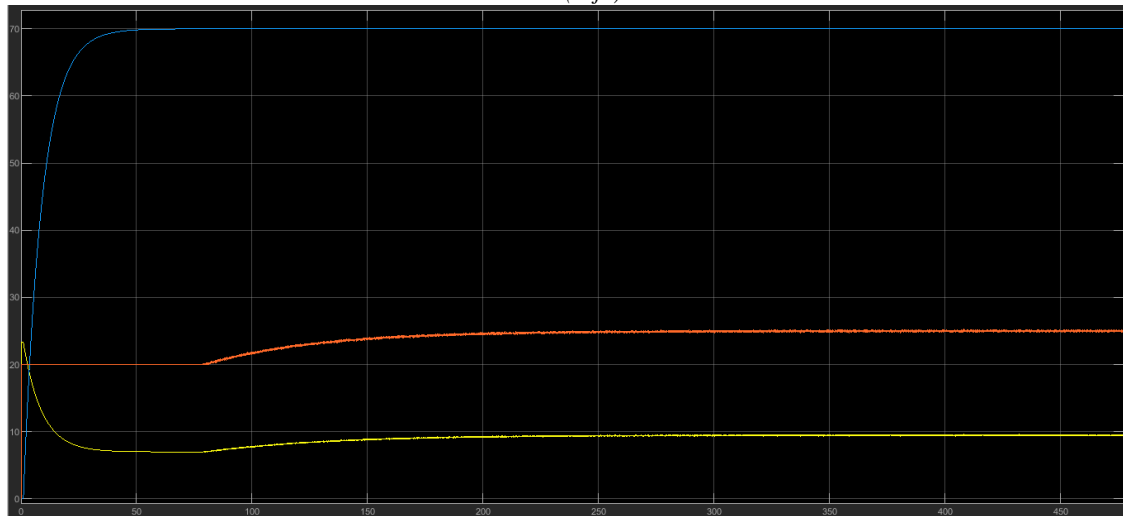
Fig. 37. Salida de la etapa de acondicionamiento del sensor flujo ante una entrada escalón de  $2.0 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}}$ .



Fig. 38: Salida del sensor de humedad ante una entrada escalón de 70 %RH.



Fig.39: Simulación de la temperatura (naranja), humedad Relativa (azul) y déficit de presión de vapor (rojo).



- Prueba #5: Simulación filtro Pasa bajas (40 Hz):
- Se realizaron dos simulaciones y se observa a continuación la señal de flujo de agua antes de pasar por el filtro (Fig. 41) y la misma señal de flujo de agua después de atravesar el filtro (Fig. 42).

Fig. 40: Diagrama de bloques del filtro pasa bajas

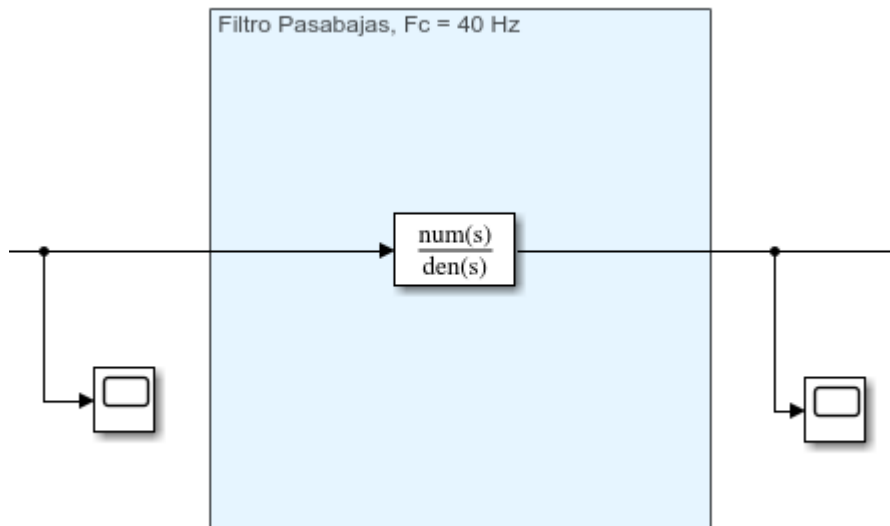
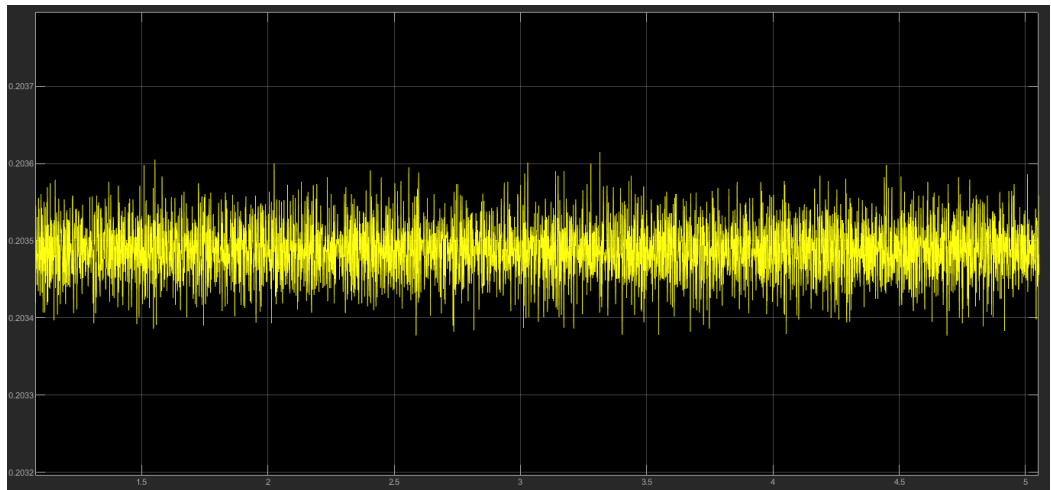
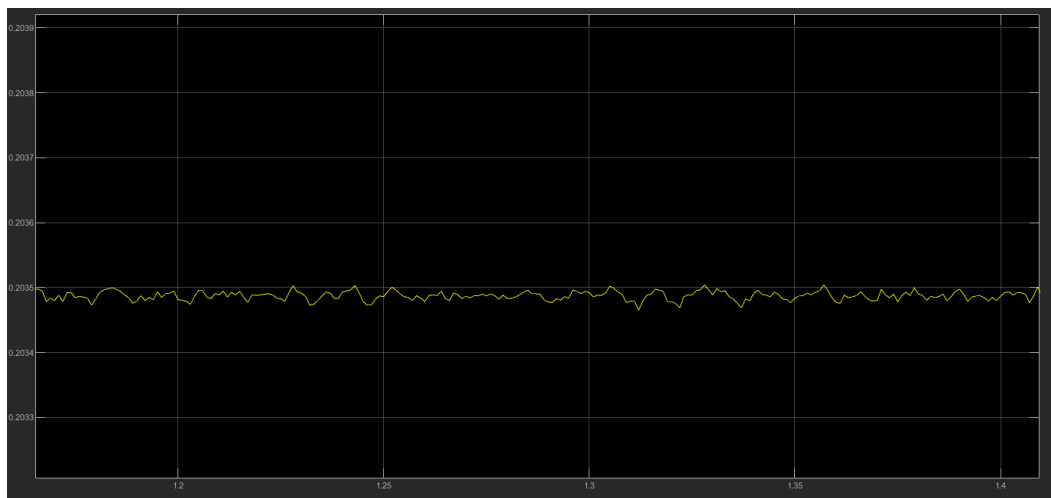


Fig. 41 : Señal Flujo de Agua, antes del filtro



*Fig. 42: Señal del caudalímetro después de aplicar el filtro pasabajas.*



## **XI. Conclusiones**

### **César:**

En conclusión, puedo afirmar que se cumplió el objetivo de esta práctica. El realizar un análisis detallado del sistema y realizar el proyecto de manera teórica me ayudó a integrar varios conceptos vistos en esta clase como el diseño de etapas de acondicionamiento analógico como el amplificador diferencial, y los filtros pasabajas. También se diseñó una GUI para la simulación del sistema.

A pesar de las complicaciones dadas a la crisis sanitaria a la que nos estamos enfrentando de manera global, pudimos integrar un proyecto por medio del uso de simulink y Matlab. El proyecto planteado puede ayudar a comunidades que tienen complicaciones para producir alimento, de manera que al implementar este sistema un huerto urbano podría incrementar la productividad de sus cosechas.



**Gustavo:**

Un sistema de monitoreo puede no ser un elemento esencial para personas con conocimientos básicos en el ámbito agrícola, mucho menos cuando se habla de un huerto casero. Sin embargo, es efectivo cuando se trata del propio cuidado y tratamiento de las plantas, en este caso, tomates.

Guadalajara es una región con constantes cambios climáticos, así como tempestades en verano y fríos violentos en inviernos. Es por esto que se recomienda el uso de un monitoreo básico. No podemos cambiar el estado meteorológico, pero si es posible disminuir el riego, asolear nuestra planta o meter la maceta a nuestra casa.

Se usaron elementos básicos para un electrónico y la implementación real puede estar un poco alejada de la simulación por no contar con los componentes físicos. Pero es una gran aproximación a los intentos de acercar lo más posible a la realidad.

**XII. Repositorio del proyecto**

[https://github.com/4497cv/Proyecto\\_Final\\_Instrumentacion](https://github.com/4497cv/Proyecto_Final_Instrumentacion)

**XIII. Hojas de datos (data sheets)**

- [LM35](#)
- [RS 256-225 Flow Sensor](#)
- [SHT11](#)
- [ATMEGA328p](#)

**XIV. Referencias**

- Fernández, J. L. (s.f.). *Temperatura*. Obtenido de FISICALAB: <https://www.fisicalab.com/apartado/temperatura>
- Fertilab. (18 de Febrero de 2019). *fertilab.com.mx*. Obtenido de <https://www.fertilab.com.mx/blog/301-requerimientos-edafoclimaticos-de-la-frambuesa/>
- Perry, J. (12 de Septiembre de 2017). *¿Cómo influye la humedad en la calidad de los cultivos?* Obtenido de PRO MIX: <https://www.pthorticulture.com/es/centro-de-formacion/como-influye-la-humedad-en-la-calidad-de-los-cultivos/>
- M. Trigui & S.F Barrington & L.Gauthier. 1999. Effects of humidity on tomato. Obtenido de: [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=18&ved=2ahUKEwjgsrvPsKjpAhUCS6wKHcDzAxMQFjARegQIBxAB&url=http%3A%2F%2Fcsbe-scgab.ca%2Fdocs%2Fjournal%2F41%2F41\\_3\\_135\\_ocr.pdf&usg=AOvVaw0YhvlwRD00GzVV4lCv9ab\\_](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=18&ved=2ahUKEwjgsrvPsKjpAhUCS6wKHcDzAxMQFjARegQIBxAB&url=http%3A%2F%2Fcsbe-scgab.ca%2Fdocs%2Fjournal%2F41%2F41_3_135_ocr.pdf&usg=AOvVaw0YhvlwRD00GzVV4lCv9ab_)

- INTAGRI. 2017. El Cultivo de la Frambuesa. Serie Frutillas Núm. 13. Artículos Técnicos de INTAGRI. México. 7 p
- Sara Pérez. 2011. Control de tanques acoplados. Escuela Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación. Obtenido de: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKEwihyP3jrKjpAhVQXq0KHXYyBBIQFjAAegQIARAB&url=http%3A%2F%2Facademica-e.unavarra.es%2Fbitstream%2Fhandle%2F2454%2F4176%2F577597.pdf%3Fsequence%3D1&usg=AOvVaw1nhy5CdGg5Xje3i29ILtRr>
- R. Ramin, J. W. Jones, K. Thorp. 2018. Review of optimum temperature, humidity, and vapour pressure deficit for microclimate evaluation and control in greenhouse cultivation of tomato. Obtenido de: [https://www.researchgate.net/publication/323225604\\_Review\\_of\\_optimum\\_temperature\\_humidity\\_and\\_vapour\\_pressure\\_deficit\\_for\\_microclimate\\_evaluation\\_and\\_control\\_in\\_greenhouse\\_cultivation\\_of\\_tomato\\_A\\_review](https://www.researchgate.net/publication/323225604_Review_of_optimum_temperature_humidity_and_vapour_pressure_deficit_for_microclimate_evaluation_and_control_in_greenhouse_cultivation_of_tomato_A_review)
- Growell. 2019. VPD In A Nutshell – Master your Humidity. Obtenido de : <https://www.growell.co.uk/advice/hints-tips/vpd-in-a-nutshell-master-your-humidity>
- Argus. 2009. Understanding and Using VPD: Argus Application Note. Obtenido de: [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjMk-S59KfpAhVRMawKHUbjA3UQFjABegQIBBAB&url=http%3A%2F%2Fargus.site%2Fresources%2FVPD\\_Application\\_Note.pdf&usg=AOvVaw1tDBFM6OIs01xSMtqUE6TI](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjMk-S59KfpAhVRMawKHUbjA3UQFjABegQIBBAB&url=http%3A%2F%2Fargus.site%2Fresources%2FVPD_Application_Note.pdf&usg=AOvVaw1tDBFM6OIs01xSMtqUE6TI)
- Went, F. W. (1953). The effect of temperature on plant growth. *Annual Review of Plant Physiology*, 4(1), 347-362. Obtenido de <https://www.annualreviews.org/doi/pdf/10.1146/annurev.pp.04.060153.002023>