

# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

## **Facultad de Ingeniería Eléctrica y Computación**

Diseño de un sistema para secado de arroz en cascara, empleando quemador de GLP, entrada de aire forzado con lazo de control de temperatura y comunicación inalámbrica utilizando equipos LORA

### **PROYECTO INTEGRADOR**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero en Electrónica y Automatización Industrial**

Presentado por:

Bryan Steven Espinosa Caicedo

Jonathan Antonio García Navas

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2023

## DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico en primer lugar, a mis padres, José Luis Espinosa y María Fernanda Caicedo, a mi hermano Luis que son pilar fundamental en mi vida.

A mi primo y pronto colega Marcelo Cevallos que desde el cielo guía mi camino profesional.

A mis profesores y compañeros de universidad, que fueron parte fundamental de toda mi preparación.

Finalmente, a mi tutor Jonathan Avilés y mi profesor Dennys Cortez por ser una gran guía a lo largo del desarrollo del proyecto.

Bryan Espinosa Caicedo.

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo, fruto de mi esfuerzo, a todas las personas que lo han hecho posible, especialmente a mi padre, mi tío, mi tía y mis 8 hermanos que me han ayudado a conseguir mi objetivo, a la ESPOL y a todos los docentes que me han guiado a lo largo de la carrera.

Jonathan García N.

## **AGRADECIMIENTOS**

Mi más sincero agradecimiento en primer lugar a DIOS por la salud y la vida, segundo a cada una de las personas afines que contribuyeron para el desarrollo del presente proyecto. A mi familia (Espinosa Caicedo), profesores y amigos por colaborarme moral, emocionalmente y con conocimientos para culminar de la mejor forma este trabajo.

Bryan Espinosa Caicedo.

## AGRADECIMIENTOS

De todo corazón agradezco a DIOS por haberme permitido vivir una hermosa etapa universitaria llena de tropiezos y victorias. Agradezco a mi padre Antonio García por brindarme su apoyo incondicional a pesar de no merecerlo. A los profesores Dennys Cortez y Jonathan Avilés por su guía para poder culminar con éxito el presente proyecto académico. A mi tía Elva Hidalgo y a mi tío Víctor Quimis quienes fueron pilar y mano guía durante gran parte de mi corta vida. A mi abuelo Juan Rosado por enseñarme a no rendirme jamás a pesar de la adversidad. A mis hermanos por su ayuda incondicional, y a todas las personas que de una u otra forma ayudaron a que hoy esté aquí escribiendo estas líneas, les estoy eternamente agradecido.

– Siempre en pie, como los árboles.

Jonathan García N.

## DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Jonathan Antonio García Navas* y *Bryan Steven Espinosa Caicedo* damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”



---

Jonathan Antonio García Navas



---

Bryan Steven Espinosa Caicedo

# EVALUADORES



Firmado electrónicamente por:  
**DENNYS DICK CORTÉZ  
ALVAREZ**

**MSc. Dennys Dick Cortez Álvarez**

PROFESOR DE LA MATERIA

*Jonathan Avilés C.*

Digitally signed by  
JONATHAN  
ABRAHAM AVILES  
CEDENO  
Reason: I have  
reviewed this  
document  
Date: 2023.02.13  
15:57:53-05'00'

**MSc. Jonathan Abraham Avilés Cedeño**

PROFESOR TUTOR

## RESUMEN

En el presente trabajo se diseñó un sistema de secado de arroz con sensores de temperatura, lazo de control, comunicación inalámbrica y sistema SCADA. Esperamos este aporte contribuya al proceso de producción de los pequeños agricultores de arroz para que de esta forma se pueda mejorar la calidad del grano y así reciban una remuneración mayor.

De acuerdo con la problemática abordada, se diseñó un sistema de secado por convección mediante el uso de aire forzado y una campana de calor empleando gas GLP. Además, se desarrolló un sistema de lazo cerrado para el control de temperatura, empleando comunicaciones inalámbricas en base a tarjetas LoRa y un sistema SCADA para monitorear el proceso.

Una vez desarrollado el planteamiento y esquematizado el sistema, se simuló el comportamiento de la planta diseñada en Matlab - Simulink, logrando obtener su función de transferencia para el posterior diseño de un controlador PI que permite estabilizar la temperatura en los valores requeridos para lograr un secado adecuado del arroz. Además, se realizó el diseño del sistema SCADA en Tia - Portal V16 para el proceso de monitoreo.

Como complemento al desarrollo, se llevó a cabo un análisis de costos para la producción del equipo, teniendo en cuenta la inversión a ser realizada por el agricultor y los beneficios económicos que obtendría, llegando así a estimar el retorno de inversión de la planta en consideración.

**Palabras clave:** Industria arrocera, Sistemas automáticos, Secado de arroz, Comunicación inalámbrica.

## **ABSTRACT**

*In the present work, a rice drying system with temperature sensors, control loop, wireless communication and SCADA system has been designed. This project contributes to the production process of small-scale rice farmers and thus improves the quality of the grain allowing them to receive a higher remuneration.*

*In accordance with the problem addressed, a convection drying system was designed using forced air and a heating chamber using LPG as fuel. In addition, a closed-loop system for temperature control has been developed, using wireless communications based on LoRa cards and a SCADA system to monitor the process.*

*Once the approach had been selected and the system components had been sized, the plant behavior was simulated using MATLAB - Simulink, allowing us to obtain its transfer function and design a PI controller to stabilize the temperature to the required values for an adequate drying. Additionally, a SCADA system in Tia - Portal V16 for monitoring tasks has been developed.*

*As a complement to the system design, a cost analysis was carried out for the equipment implementation, taking into account the investment to be made by the farmer and the economic benefits that he would obtain, thus estimating the return on investment of the plant under consideration.*

**Keywords:** *Rice industry, Automatic systems, Rice drying, Wireless communication.*

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	VII
ABSTRACT.....	VIII
ÍNDICE GENERAL.....	IX
ABREVIATURAS .....	XII
SIMBOLOGÍA .....	XIII
ÍNDICE DE FIGURA .....	XIV
ÍNDICE DE TABLAS .....	XVI
ÍNDICE DE PLANOS .....	XVII
CAPÍTULO 1.....	18
INTRODUCCIÓN .....	18
1.1. Descripción del problema .....	19
1.2. Justificación del problema.....	19
1.3. Objetivos.....	20
1.1.1. Objetivo General .....	20
1.1.2. Objetivos Específicos .....	20
1.4. Marco teórico .....	20
1.1.3. Métodos de secado del arroz .....	20
1.1.4. Equipos para secado del grano de arroz.....	22
1.1.5. Motor asincrónico o motor de inducción.....	22
1.1.6. Soplador de aire (Blower).....	22
1.1.7. Válvula de gas industrial.....	23
1.1.8. Quemador de gas licuado de petróleo (GLP) .....	23
1.1.9. Sensor resistivo de temperatura RTD .....	24
1.1.10. Controlador Lógico Programable (PLC).....	24
1.1.11. Sistema de transporte de arroz .....	25
1.1.12. Sistema comunicación inalámbrica LoRa.....	26

1.1.13. Sistema de control PI .....	27
CAPÍTULO 2.....	28
METODOLOGÍA.....	28
2.1. Sistema de control con lazo cerrado.....	28
2.2. Obtención del caudal de aire requerido .....	29
2.3. Dispositivo de soplado (Blower).....	33
2.4. Energía generada por el quemador de GLP .....	33
2.5. Transferencia de calor del equipo.....	34
2.6. Electroválvula proporcional .....	35
2.7. Capacidad calorífica de la válvula por volumen de GLP.....	35
1.6.1 Componente eléctrica.....	36
1.6.2 Acoplamiento electromecánico .....	37
1.6.3 Componente mecánico.....	37
2.8. Sistema de aire variable con válvula de gas GLP fija.....	38
2.9. Sistema de aire constante con válvula gas proporcional.....	38
2.10. Función de transferencia del sistema .....	39
2.10.1. Modelos agrupados de sistemas térmicos.....	39
2.10.2. Función de la electroválvula y la campana de calor .....	41
2.10.3. Función de humedad en equilibrio.....	42
2.10.4. Función de humedad en el tiempo .....	43
2.10.5. Función de transferencia de la Planta .....	46
2.10.6. Diseño del controlador.....	47
2.11. Controlador del sistema .....	47
2.12. Equipos de comunicación .....	48
2.13. Sensores.....	50
CAPÍTULO 3.....	51
RESULTADOS Y ANÁLISIS .....	51

3.1.	Caso de estudio.....	51
3.2.	Pruebas de simulación.....	51
3.2.1.	Respuesta de calor en función de la apertura de válvula .....	51
3.2.2.	Respuesta de humedad con respecto a la temperatura .....	52
3.2.3.	Función de transferencia de la planta en lazo abierto .....	54
3.2.1.	Función de transferencia de la planta en lazo cerrado .....	55
3.3.	Costos.....	57
3.3.1.	Inversión .....	57
3.3.2.	Retorno de inversión.....	58
CAPÍTULO 4.....		60
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....		60
4.1.	Conclusiones.....	60
4.2.	Recomendaciones .....	61
BIBLIOGRAFÍA.....		61
APÉNDICE .....		65
APÉNDICE A.....		66
APÉNDICE B.....		67
APÉNDICE C.....		76
APÉNDICE D.....		84
APÉNDICE E.....		87

## ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
GLP	Gas Licuado de Petróleo
LoRa	Antenas de largo alcance (Long Range)
PID	Control Proporcional Integral Derivativo
PLC	Programmable Logic Controller (Controlador lógico programable)
RTD	Resistance Temperature Detector (Detector de temperatura resistivo)
PC	Computadora
(ES)	Entradas / Salidas
PI	Control Proporcional Integral
RPM	Revolución por minuto

## SIMBOLOGÍA

m	Metro
t	Tonelada
kcal	Kilocalorías
kg	Kilogramos
h	Hora
$m^3$	Metro cúbico
°C	Centígrados
kJ	Kilojulios
°K	Kelvin
min	Minutos
A	Amperios
V	Voltios
W	Vatios
H	Henrios
F	Faradios

# ÍNDICE DE FIGURA

## CAPÍTULO 1

Figura 1.1 Silo de almacenamiento de arroz.....	22
Figura 1.3 Motor ventilador con aspas.....	23
Figura 1.4 Válvula de gas industrial de GLP .....	23
Figura 1.5 Quemador industrial de GLP.....	24
Figura 1.6 Sensor de temperatura resistivo. [12] .....	24
Figura 1.7 Diagrama estructural de un PLC [13].....	25
Figura 1.8 Cinta transportadora tipo cangilones .....	26
Figura 1.9 Transportador de tornillo sin fin.....	26
Figura 1.10 Comunicación inalámbrica LoRa.....	27
Figura 1.11 Sistema de control con lazo PI.....	27

## CAPÍTULO 2

Figura 2.1 Prototipo de silo de almacenamiento [10].....	31
Figura 2.2 Estufa de Gas Industrial modelo HD162.....	34
Figura 2.3 Flujo de aire dentro de la tolva.....	35
Figura 2.4 Representación del modelo masa - bobina. [18].....	36
Figura 2.5 Representación en diagrama de bloques de la electroválvula Simulink – MATLAB .....	41
Figura 2.6 Representación en diagrama de bloques de la función de la humedad en equilibrio Simulink – MATLAB.....	42
Figura 2.7 Representación en diagrama de bloques de la función de la humedad en el tiempo Simulink – MATLAB .....	44
Figura 2.8 Representación en diagrama de bloques de la densidad específica del arroz en cáscara en función de la humedad Simulink – MATLAB.....	45
Figura 2.9 Representación en diagrama de bloques de la Conductividad térmica del arroz en cáscara en función de la humedad Simulink – MATLAB.....	45
Figura 2.10 Representación en diagrama de bloques de la función de planta en Simulink – MATLAB .....	46
Figura 2.11 Respuesta más eficiente del controlador PI.....	47
Figura 2.12 PLC S7-1200 CPU 1214c AC/DC/RLY .....	48
Figura 2.13 Convertidor LoRa a Ethernet/USB modelo LR-201-E.....	49

Figura 2.14 Topología de red de comunicación del sistema SCADA.....	50
Figura 2.15 Sensor de temperatura resistivo PT100.....	50

### **CAPÍTULO 3**

Figura 3.1 Calorías generadas por el quemador en función del porcentaje de apertura de la válvula.....	52
Figura 3.2 Comportamiento de la Humedad en el grano en función de la temperatura aplicada .....	53
Figura 3.3 TF del sistema en lazo abierto .....	54
Figura 3.4 TF del sistema en lazo cerrado.....	55

### **APÉNDICE A**

Figura A. 1 Tendales de cemento y proceso de secado de arroz al aire libre.....	66
---	----

### **APÉNDICE B**

Figura B. 1 Sistema de secado con válvula proporcional.....	69
Figura B. 2 Subsistema humedad vs temperatura. ....	70
Figura B. 3 Ecuación de Henderson .....	71
Figura B. 4 Humedad inicial en equilibrio.....	72
Figura B. 5 Densidad y calor específico del arroz en cascara en función de la humedad. ....	73
Figura B. 6 Constante de la función de humedad en el sistema .....	74
Figura B. 7 Sistema completo representado en función de transferencia. ....	75

### **APÉNDICE C**

Figura C. 1 SISTEMA SCADA. ....	76
Figura C. 2 BLOQUE DE PROGRAMAS .....	77
Figura C. 3 BLOQUE DE MAIN PROGRAM .....	78
Figura C. 4 BLOQUE FB DE CONTROL .....	79
Figura C. 5 BLOQUE FB DE CONTROL .....	80
Figura C. 6 BLOQUE PID Compact.....	81

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Condiciones para el proceso de secado [15].	29
Tabla 2.2 Variables requeridas para evaluar en la Ecuación (2.2).	32
Tabla 2.3 Centrífugos de alta presión – Turbo soplador (Serie STF) marca FENK [16].	33
Tabla 2.4 Variables requeridas para la relación de capacidad calorífica y volumen de gas GLP. [17].	35
Tabla 2.5 Constantes de los modelos para las isotermas de desorción. [20].	43
Tabla 2.6 Características del controlador.	48
Tabla 2.7 Características de la pasarela. [23].	49
Tabla 2.8 Características Técnicas del sensor de temperatura PT100. [25].	50
Tabla 3.1 comportamiento de humedad vs temperatura sin controlador.	53
Tabla 3.2 comportamiento de humedad vs temperatura con controlador PI.	56
Tabla 3.3 Costos de los elementos para el desarrollo del equipo.	57
Tabla 3.4 Costo final del proyecto en función del número de equipos.	58
Tabla 3.5 Tabla de costos comparativos de los tipos de secado.	58
Tabla 3.6 Tabla de rentabilidad con uso del equipo.	58
Tabla 3.7 Rentabilidad con uso propio y alquiler.	58
Tabla 3.8 Utilidad neta producida por el equipo.	59

## ÍNDICE DE PLANOS

### APÉNDICE D

Figura D. 1 Plano Eléctrico secadora de arroz en cáscara.....	84
Figura D. 2 Plano eléctrico de fuerza.....	84

### APÉNDICE E

Figura E. 1 Plano mecánico de la planta secadora de arroz.....	87
Figura E. 2 Plano vista superior de la planta secadora de arroz.....	87
Figura E. 3 Plano vista lateral de la secadora de arroz.....	87

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

“Ecuador es un país productor y consumidor de arroz” [1], un ecuatoriano promedio está consumiendo alrededor de 43 a 45 kg de arroz por año, cercano al promedio mundial por persona que fue de 58.4 kg en 2019 [2].

A nivel local, el 83% de los cultivos se encuentran en las zonas de Guayas y Los Ríos, en la región costa. Actualmente el costo de los insumos y la mano de obra están superando con creces el valor que se obtiene a la hora de vender el producto, lo que está representando pérdidas para el agricultor.

Además, la producción de arroz se ve mermada no solo por el costo de los insumos sino también por plagas y el temporal lluvioso. Los dueños de piladoras señalan que durante el invierno la producción de arroz baja y esto hace que el precio del grano se incremente, por ello, muchos productores optan por guardar la cosecha y venderla en el invierno, pero el invierno trae consigo a uno de los grandes enemigos del arroz, la humedad.

Y es que la humedad presente en el arroz hace que este sea susceptible a plagas; una de ellas coloquialmente conocido como “gorgojo” de la familia de los Curculionidae. Además de hongos y moho que deterioran la calidad del producto, y esto afecta directamente al precio que el agricultor recibe por el mismo. Cuando el grano es cosechado, normalmente posee una humedad en promedio de 20 a 24% cuando el arroz está en su punto óptimo de cosecha [3], motivo por el cual no puede ser almacenado por mucho tiempo, inmediatamente después de ser cosechado.

El presente trabajo de titulación está enfocado a resolver el problema de secado del arroz, desarrollando un modelo teórico del proceso, diseñando un sistema de control de temperatura y realizando un análisis de rentabilidad de la implementación.

## **1.1. Descripción del problema**

Actualmente muchos de los pequeños agricultores que guardan sus cosechas para venderlas en temporadas invernales realizan un proceso de secado al aire libre, que consiste en verter el arroz en tendales de cemento (ver figura A.1), donde el arroz se seca debido a las corrientes de aire y el sol.

El proceso de secado al aire libre toma de 2 a 3 días para la misma cantidad de arroz, lo que representa gastos en mano de obra, en ensacado y transporte de la gramínea, además que el proceso depende estrictamente del clima y de la estación (verano o invierno). Secar el arroz luego de haber sido cosechado es de suma importancia para que pueda ser almacenado.

Podemos optimizar el proceso de secado utilizando un lazo de control que mantenga la temperatura en un valor constante adecuado para el arroz. El sistema permitirá al operador monitorear todas las variables del proceso desde un sistema SCADA comunicado inalámbricamente usando equipos LORA que son altamente resistentes a las perturbaciones externas.

## **1.2. Justificación del problema**

Al obtener un proceso que utiliza tecnología inalámbrica se reduce el costo de ensamble y mantenimiento, además que la información del proceso puede ser transmitida a una distancia mayor en comparación con la red cableada.

El sistema aporta valor al trabajo que desarrollan los agricultores con producción de pequeña y mediana escala, ya que, al retirar la humedad del arroz, los agricultores pueden vender su producto a un mejor precio en comparación a si lo venden sin ser procesado debido a que el arroz recién cosechado presenta una humedad mayor al 20% y esto ocasiona una penalización económica por parte de las piladoras y centros de acopios.

Además, con una planta de secado, el agricultor ya no depende del clima ya que este es muy variante y no se puede controlar a voluntad y esto le permite realizar su proceso de secado en todas las épocas del año.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.1.1. Objetivo General**

Diseñar de un sistema de transferencia de calor por aire forzado y quemador de GLP para secar arroz que utilice un enlace de comunicación inalámbrica a larga distancia con equipos LORA para transferencia de datos entre la planta y el sistema SCADA.

#### **1.1.2. Objetivos Específicos**

1. Diseñar el sistema de transferencia de calor a ser controlado.
2. Implementar un enlace de comunicación inalámbrico con alta resistencia a la interferencia y bajo consumo de potencia utilizando tarjetas LORA.
3. Realizar el control del sistema de transferencia de calor utilizando un PLC marca Siemens 1214C AC/DC/RL.
4. Sintonizar los parámetros del módulo de control PID.

### **1.4. Marco teórico**

#### **1.1.3. Métodos de secado del arroz**

El secado del grano se realiza para prevenir la descomposición y aparición de hongos garantizando la calidad del producto [4]. Además, el grano húmedo posee una flora microbiana típica que proviene del suelo; estos microorganismos pueden desarrollarse en el grano húmedo y generar micotoxinas letales, por estos y otros factores el grano debe almacenarse solo después de garantizar la reducción del contenido de humedad hasta el 14% como mínimo [5].

“India, con 24.279 millones de kilogramos es el principal exportador de arroz en el mundo” [6], debe utilizar procesos industrializados para el secado del arroz. Para retirar la humedad del grano primero lo ponen a remojar a 70 °C en tanques con agua, elevando la humedad hasta un 34% y luego lo pasan al proceso de secado reduciendo dicha humedad hasta un 10% [7], para lo cual emplean equipos especiales para secado de arroz en cascara como el SUNCUE PHS-320, un secador de arroz al vapor que garantiza un secado rápido y uniforme [8].

Los dos métodos más utilizados para realizar el secado son los siguientes.

1. **Secado en flujo continuo:** El producto se desplaza de un punto inicial a un punto final por medio de mecanismos como bandas transportadoras o por gravedad en sistemas de secado rotativo. El producto se seca mientras se va desplazando por la máquina de secado. Este método es el más utilizado actualmente por su velocidad y uniformidad de secado, pero al ser un mecanismo que se encuentra en movimiento continuo, puede provocar que el arroz se fragmente si no existe un control de temperatura preciso y se caliente de más [9].
2. **Secado de 2 etapas:** El producto es depositado en un contenedor y es calentado a través del flujo de aire, el producto permanece estático mientras el flujo de aire calienta los granos. Este tipo de secado presenta una ventaja en relación con el secado de flujo continuo y es que el grano no se maltrata debido al movimiento, sin embargo, la desventaja es que si el sistema no está bien diseñado no existirá uniformidad en el secado y existirán zonas con arroz que presenten un porcentaje de humedad más alto.

En el presente proyecto vamos a enfocarnos en desarrollar un sistema de secado de 2 etapas para lo cual vamos a utilizar los siguientes componentes.

#### **1.1.4. Equipos para secado del grano de arroz**

**Silo de almacenamiento:** Los silos son elementos empleados en las industrias para el almacenamiento o procesamiento de grano, estos podrían tener una arquitectura hermética o modificable de acuerdo con la ampliación que se vaya a emplear. Estos dispositivos son comúnmente empleados para almacenar una extensa gama de productos, bien sea granos, harinas, forraje o líquidos [10].



**Figura 1.1 Silo de almacenamiento de arroz.**

#### **1.1.5. Motor asincrónico o motor de inducción**

La principal función de un motor asíncrono o motor de inducción es la de convertir energía eléctrica en movimiento mecánico, para ello se aprovecha el campo electromagnético generado por las bobinas y por un rotor. Se denomina asíncrono porque su campo estático nunca iguala la velocidad de giro del eje del motor [11].

#### **1.1.6. Soplador de aire (Blower)**

Un soplador de aire es un motor el cual posee una estructura metálica añadida y es empleado para la producción de flujo de aire a presiones considerables. Este dispositivo es mayormente empleado en las industrias para diferentes procesos donde se requiera este tipo de intervención.



**Figura 1.2 Motor ventilador con aspas.**

### **1.1.7. Válvula de gas industrial.**

Las válvulas de gas son dispositivos que controlan el flujo hasta poderlo interrumpir, si así se lo desea. Estos dispositivos son muy utilizados en la industria sobre todo el equipo que funcionan con gas licuado de petróleo (GLP).



**Figura 1.3 Válvula de gas industrial de GLP.**

### **1.1.8. Quemador de gas licuado de petróleo (GLP)**

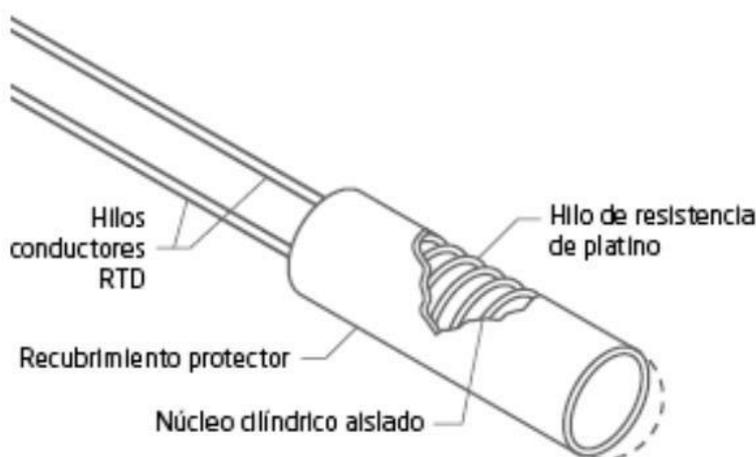
Son dispositivos que se encargan de hacer la mezcla entre el aire y el gas manteniendo las proporciones necesarias para que se realice la combustión y de esta forma mantiene constante la llama. Los quemadores industriales generan 150000 kcal/h y normalmente son de tipo ON/OFF. El quemador es el encargado de calentar el aire circundante que será expulsado por acción del soplador de aire hacia el silo.



**Figura 1.4 Quemador industrial de GLP.**

### **1.1.9. Sensor resistivo de temperatura RTD**

Sirve para capturar la información de sobre cómo está comportándose el sistema en cuanto a temperatura se refiere. Este dispositivo es el que me permite realizar el sistema de lazo cerrado en el control de temperatura.

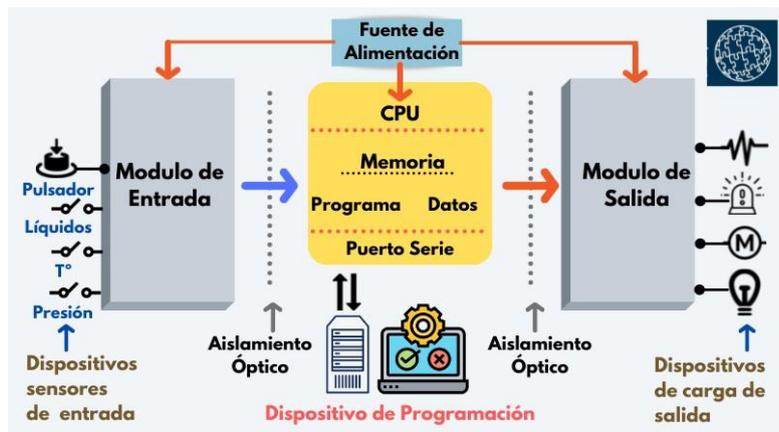


**Figura 1.5 Sensor de temperatura resistivo. [12]**

### **1.1.10. Controlador Lógico Programable (PLC)**

Los PLC reciben datos de sensores y dispositivos de entrada, los procesan para tomar decisiones basadas en la lógica y emiten instrucciones de control a los sistemas mecánicos o eléctricos. Son un tipo de sistema integrado que combina el procesador y la memoria de la computadora con dispositivos de entrada-salida (ES), al igual que la lógica basada en relés y en PC con la que compiten.

Es el controlador lógico programable encargado de realizar el control del sistema por medio de los sensores y actuadores.



**Figura 1.6 Diagrama estructural de un PLC [13].**

### 1.1.11. Sistema de transporte de arroz

El arroz se considera un producto frágil o quebradizo y, cuando se transporta de manera brusca o incorrecta, puede sufrir la degradación del producto. El cable de arrastre de acero inoxidable revestido y flexible cuenta con discos circulares sólidos unidos a intervalos precisos para empujar el producto a través del tubo de transporte sin aire ni fuerza excesiva. Este sistema y método de transporte preserva la integridad del producto de materiales delicados como el arroz y los subproductos del arroz.

### Cinta transportadora de cangilones

El elevador de cubos es un tipo de equipo de transporte vertical, que se utiliza para el levantamiento vertical de polvo y materiales de partículas. Sus características son: altura de elevación grande, rendimiento de elevación estable, área de ocupación pequeña, buen sellado y larga vida útil. La altura de elevación es ajustable según las necesidades (generalmente de 7 a 10 metros) del usuario. Es la maquinaria de transporte vertical más utilizada en la fábrica de aceite comestible y la planta de aceite vegetal.



**Figura 1.7 Cinta transportadora tipo cangilones.**

### **Transportadores de tornillo flexible**

Los transportadores de tornillo flexible están disponibles sobre marcos montados sobre ruedas giratorias con mástiles de soporte del transportador para movilidad dentro de la planta, lo cual reduce la necesidad de múltiples unidades estacionarias.



**Figura 1.8 Transportador de tornillo sin fin.**

### **1.1.12. Sistema comunicación inalámbrica LoRa**

LoRa es una tecnología inalámbrica que emplea un tipo de modulación en radiofrecuencia. LoRa (que significa Long Range) es una tecnología de

comunicación inalámbrica patentada que combina un consumo de energía ultra bajo con un largo alcance efectivo.

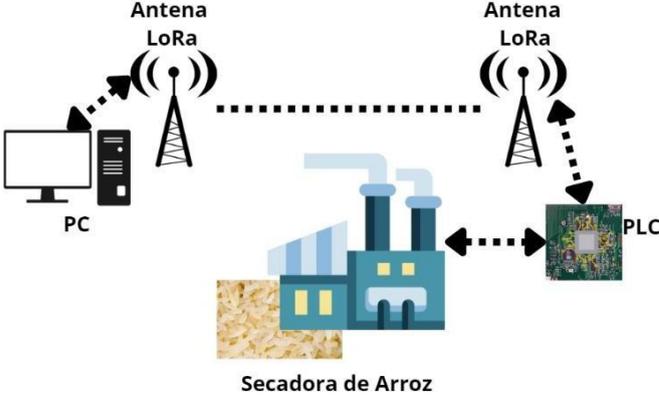


Figura 1.9 Comunicación inalámbrica LoRa.

**1.1.13. Sistema de control PI**

El sistema de control Proporcional Integral (PI) es un elemento de transferencia de un sistema de control lazo cerrado y está compuesto por dos elementos P e I. La respuesta de paso del controlador PI muestra que el componente P adelanta o atrasa el efecto del controlador I por el tiempo de acción-integral. Por consiguiente, el componente P permite que sea corregido ligeramente en el tiempo de estabilización, mientras que el componente I permite una corrección completa minimizando el error de control. [14]

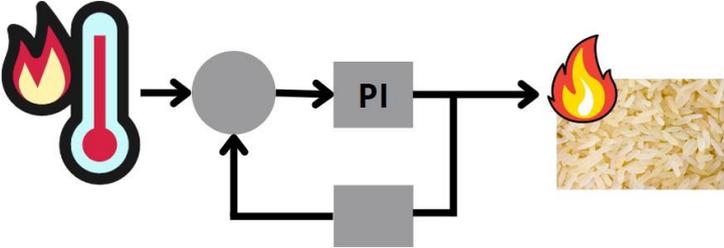


Figura 1.10 Sistema de control con lazo PI.

# CAPÍTULO 2

## 2. METODOLOGÍA

La temperatura en este proceso es variable, sabemos que si se produce un mal secado del grano de arroz este se fragmentaría cuando sea pilado. La velocidad de extracción de humedad (punto de humedad por hora) influye de manera directa en la cantidad de granos fisurados debido al secado artificial. El mejor secado se da cuando el punto de humedad por hora es menor a 50%.

Se debe ajustar la temperatura de secado automáticamente según las condiciones climáticas externas para reducir el tiempo de secado y aumentar la producción dando a la planta de secado la capacidad de poder trabajar las 24 horas.

### 2.1. Sistema de control con lazo cerrado

El control proporcional – integral (PI) se basa en variabilidad del valor de salida del controlador, con razón de proporción respecto al tiempo en que permanece el error. Esto implica que la temperatura diferente a la 50 °C, se detecte como un valor el cual se deba equilibrar ascendiendo paulatinamente del valor configurado como lumbral.

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_N \cdot s} \right) \quad (2.1)$$

En la ecuación (2.1) donde  $K_p$  es la ganancia y  $T_N$  es el tiempo de acción de acción integral. El tiempo integral regula la velocidad de acción de control, mientras que una modificación en  $K_p$  afecta tanto a la parte integral como a la parte proporcional de la acción de control. [15]

Para el presente desarrollo sabemos que los cambios de temperatura son lentos y sin cambios abruptos, por lo tanto, descartamos el uso de un controlador proporcional – integral – derivativo (PID).

**Tabla 2.1 Condiciones para el proceso de secado [16].**

<b>Característica</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Porcentaje de humedad inicial	24%	<i>Adimensional</i>
Porcentaje de humedad final	14%	<i>Adimensional</i>
Carga inicial de la torre	1,7	[t]
Carga final de la torre	1,56	[t]
Poder calorífico del GLP	11739	$\left[\frac{kcal}{kg}\right]$
Consumo de combustible del quemador (máxima potencia)	0,46	$\left[\frac{kg}{h}\right]$

## 2.2. Obtención del caudal de aire requerido

Para el desarrollo de la obtención del caudal iniciamos con la fórmula de flujo másico del aire, donde intervienen todas las variables físicas de interés:

$$m_a = \frac{m_w * (C_{pw} * \Delta T_w + h_{fg})}{n_s * C_{pa} * \Delta T_a} \quad (2.2)$$

En la Ecuación 2.2 tenemos  $m_a$  como flujo másico del aire, en el numerador tenemos la variable  $m_w$  que representa la masa del agua extraída multiplicada por  $C_{pw}$  calor específico del vapor de agua por  $\Delta T_w$  que representa el cambio de temperatura experimentada por el arroz durante el secado y a esto se suma  $h_{fg}$  que representa la entalpía de vaporización del agua. En denominador tenemos  $n_s$  que representa la eficiencia del proceso multiplicando a  $C_{pa}$  que representa el calor específico del aire y finalmente  $\Delta T_a$  que representa el cambio de temperatura del proceso de secado.

Para tener los valores de las variables de la Ecuación 2.2 debemos realizar análisis por separado de cada una de ellas para finalmente poderlas reemplazar y poder obtener los valores pertinentes.

Para proceder a calcular la masa del agua extraída  $m_w$ , tenemos que evaluar los valores de  $\Delta humedad$  que representa la variación de humedad y el tiempo en el cual se desarrolló.

$$\begin{aligned}
 m_w &= \frac{m_{arroz} * \Delta humedad}{t} \\
 m_w &= \frac{m_{arroz} * (24 - 13)}{4} \\
 m_w &= 2,75 * m_{arroz} \left[ \frac{m^3}{h} \right]
 \end{aligned}
 \tag{2.3}$$

Donde sabemos que la variable  $m_{arroz}$  es la masa del arroz.

Luego de ello, para calcular la variación de temperatura experimentada por el arroz  $\Delta T_w$  tenemos que evaluar los valores lumbrales a los cuales se tiene un proceso correcto que son  $50^\circ C$  como temperatura máxima del proceso y  $25^\circ C$  que es la temperatura ambiente.

$$\Delta T_w = T_{arroz} - T_{ambiente}
 \tag{2.4}$$

$$\Delta T_w = 50 - 25$$

$$\Delta T_w = 25 [^\circ C]$$

El silo que estamos proponiendo tiene paredes de placa perforada para que el aire caliente que ingresa por la parte superior salga radialmente del cilindro concéntrico, con una capacidad máxima de 1,78 toneladas de arroz en cascara.



**Figura 2.1 Prototipo de silo de almacenamiento [10].**

Este mecanismo facilitará el contacto de los granos de este cereal con el aire, y de esta forma extraer la humedad para poder ser comercializado.

Considerando que el volumen específico del arroz en cascara es  $1,6 \left[ \frac{m^3}{T} \right]$  y nuestro equipo aproximadamente posee capacidad para 1,78 toneladas máximo, entonces tenemos que  $m_{arroz} = 2,86 [m^3]$

Consideraremos una eficiencia del 80% ( $n_s = 0,80$ ) para nuestro equipo, siendo este un valor muy bueno para lograr la finalidad planteada de correcto secado del arroz sin interferir en las propiedades de este cereal.

**Tabla 2.2 Variables requeridas para evaluar en la Ecuación (2.2).**

Variable	Valor
Calor específico del vapor de agua	$C_{pw} = 2,01 \left[ \frac{kJ}{kg * K} \right]$
Entalpía de vaporización del agua	$h_{fg} = 2257 \left[ \frac{kJ}{kg} \right]$
Calor específico del aire	$C_{pa} = 1,005 \left[ \frac{kJ}{kg * K} \right]$
Cambio de temperatura del proceso de secado	$\Delta T_a = 10 [^{\circ}C]$
Cambio de temperatura experimentada por el arroz durante el secado	$\Delta T_w = 25 [^{\circ}C]$
Flujo de masa del agua extraída	$m_w = 2,75 * m_{arroz} \left[ \frac{m^3}{h} \right]$
Masa del arroz	$m_{arroz} = 2,86 [m^3]$
Eficiencia del proceso	$n_s = 0,80$

Una vez que se tiene los valores de las variables que interfieren según la Tabla 2.2, procedemos a remplazar en la Ecuación (2.2) y obtener el valor del flujo másico del aire  $m_a$ .

$$m_a = \frac{\frac{2,75 * m_{arroz}}{H} * \left( 2,01 \frac{kJ}{kg * K} * 25K + 2257 \frac{kJ}{kg} \right)}{n_s * 1,005 \frac{kJ}{kg * K} * 1K}$$

$$m_a = \frac{631,34 * m_{arroz}}{n_s * H}$$

$$m_a = \frac{631,34 * 2,86m^3}{n_s * H}$$

$$m_a = \frac{1805,6}{n_s} \left[ \frac{m^3}{H} \right]$$

$$m_a = \frac{1805,6}{0,8} \left[ \frac{m^3}{h} \right]$$

$$m_a = 2257,04 \left[ \frac{m^3}{H} \right]$$

### 2.3. Dispositivo de soplado (Blower)

De acuerdo con el flujo de aire requerido, procedemos a la selección del equipo de introducción de aire, donde encontramos que el motor que necesitamos para ejercer la acción es un ventilador centrífugo con motor de 1HP. Posee un caudal de aire de  $50 \left[ \frac{m^3}{min} \right]$  lo que equivale a  $3000 \left[ \frac{m^3}{h} \right]$  que alcanza a suplir la demanda.

**Tabla 2.3 Centrifugos de alta presión – Turbo soplador (Serie STF) marca FENK [17].**

Modelo	Standard	HP	RPM	Caudal $\left[ \frac{m^3}{min} \right]$	Presión (MMCA)	Código 220 [V]	Código 380 [V]
ST-20	214	0,5	1400	25	40	406.75	406.62
ST-25	212	1	1400	50	60	406.76	406.63
ST-28	300	2	1400	60	70	406.77	406.64

### 2.4. Energía generada por el quemador de GLP

La cantidad de calor requerido por hora para el secado del producto en esta aplicación.

$$E = \text{consumo de gas del quemador} * \text{poder calorífico del gas} \quad (2.5)$$

$$E = 0,46 \left[ \frac{kg}{h} \right] * 11739 \left[ \frac{Kcal}{kg} \right]$$

$$E = 5399,94 \left[ \frac{Kcal}{h} \right]$$

Luego de obtener la cantidad de calor, conseguimos la cantidad de calor específico requerido.

$$Q = \frac{E}{\frac{1700 \text{ kg}}{4 \text{ [h]}} \cdot 5399,94 \text{ [Kcal]}}$$

$$Q = \frac{h}{\frac{1700 \text{ Kg}}{4 \text{ [h]}} \cdot \text{Kcal}}$$

$$Q = 12,7 \text{ [} \frac{\text{Kcal}}{\text{kg}} \text{]}$$

El modelo recomendado por el fabricante para el secado de alimentos es SGR1602 donde se indica que el consumo de gas es de  $0,46 \text{ [} \frac{\text{kg}}{\text{h}} \text{]}$  y la cantidad de calor que produce es  $5400 \text{ [} \frac{\text{kcal}}{\text{h}} \text{]}$ , lo que se acopla perfectamente a los requerimientos del equipo y observamos que el GLP sí es capaz de suplir la demanda de calor.



**Figura 2.2 Estufa de Gas Industrial modelo HD162**

## **2.5. Transferencia de calor del equipo**

El calor transmitido a través del grano provocará temperaturas diferentes entre el extremo más cercano a la fuente y el extremo más alejado, por eso secar el grano directo a 50 grados siempre, es un error, siendo mejor aumentar progresivamente la temperatura cada vez que la diferencia de temperatura en los extremos se acerque a cero, esto garantiza un secado más uniforme y reduce el estrés por temperatura en el grano que está cerca a la fuente.

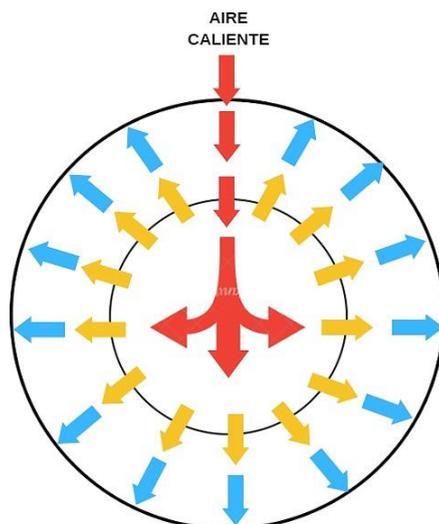


Figura 2.3 Flujo de aire dentro de la tolva.

## 2.6. Electroválvula proporcional

Una electroválvula consta de parte eléctrica y parte mecánica con acoplamiento electromecánico entre ambas partes. Para modelar matemáticamente el funcionamiento de la electroválvula, debemos considerar estas 3 partes por separado.

## 2.7. Capacidad calorífica de la válvula por volumen de GLP

Tabla 2.4 Variables requeridas para la relación de capacidad calorífica y volumen de gas GLP. [18]

Característica	Valor	Unidad
Diámetro del Inyector ( $\emptyset$ )	0,88	[mm]
Densidad relativa (drel)	1,66	Adimensional
Coeficiente de flujo (k)	0,80	Adimensional
Presión estática de flujo (h)	279,40	[m]
Poder calorífico del GLP (PCG)	22244,00	$\frac{kcal}{m^3}$

Relacionando la capacidad calorífica del gas  $PCG$  y el flujo volumétrico  $V$  en la ecuación de potencia del quemador ' $Q_t$ ' tenemos que:

$$Q_t = V * PCG \text{ [kcal]} \quad (2.6)$$

Despejando el flujo volumétrico tenemos la función que depende del diámetro del inyector.

$$V = \frac{11}{10^3} * k * \phi * \sqrt{\frac{h}{drel}} \quad [m^3] \quad (2.7) [18]$$

Reemplazando los valores de la tabla (2.4) en las ecuaciones (2.6) y, además, reemplazando a su vez la ecuación (2.7) en la (2.6) tenemos:

$$Qt = 22356 * 10^3 * \phi \quad [kcal]$$

### 2.7.1 Componente eléctrica

La parte eléctrica consiste en un inductor:

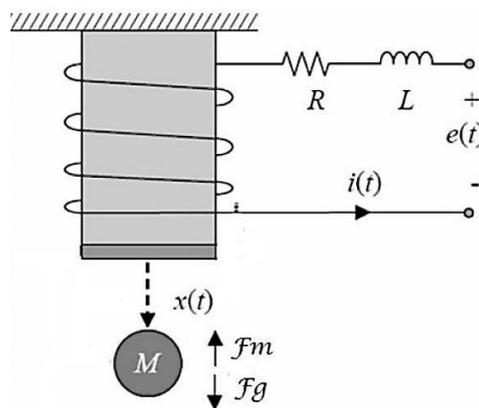


Figura 2.4 Representación del modelo masa - bobina. [19]

$$v(t) = L \frac{di}{dt} + Ri \quad (2.8)$$

Utilizando la transformada de Laplace para la Ecuación (2.6), tenemos lo siguiente.

$$V(s) = LsI(s) + RI(s)$$

Como nos interesa saber la corriente a través del tiempo nosotros procedemos a despejar esta variable.

$$I(s) = V(s) * \frac{1}{Ls + R}$$

### 2.7.2 Acoplamiento electromecánico

El acoplamiento electromecánico está dado por la fuerza generada por la corriente que induce un campo magnético, además sabemos que la constante  $K_s \left[ \frac{Nw}{A} \right]$ .

$$f = K * I \text{ [Nw]} \quad (2.9)$$

Planteado la ecuación y aplicando la transformada de Laplace.

$$F(s) = K(s)I(s)$$

### 2.7.3 Componente mecánico

La parte mecánica está dada por un sistema de segundo orden con rozamiento y un resorte que regresa la compuerta de la electroválvula a su posición inicial una vez se corta el suministro de corriente.

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx = f(t) \quad (2.10)$$

Aplicando la transformada de Laplace a la Ecuación (2.8) tenemos.

$$ms^2X(s) + bsX(s) + kX(s) = F(s)$$

$$X(s) = F(s) * \frac{1}{ms^2 + bs + k}$$

Donde la  $m$  representa la masa del sello que normalmente es en forma esférica, la variable  $b$  representa el coeficiente de rozamiento entre la esfera de sellado y las paredes de la válvula llamada también fricción dinámica; finalmente tenemos la variable  $k$  que este caso representa la constate elasticidad del resorte, pudiendo o no existir en el sistema.

La función de transferencia de la electroválvula entonces será.

$$I(s) = \frac{K_s}{(Ls + R)(mS^2 + bS + k)} \quad (2.11)$$

### **2.8. Sistema de aire variable con válvula de gas GLP fija**

El sistema que produce el calor para la extracción de la humedad del arroz es el sistema de gas de GLP, al nosotros tener una válvula de gas fija vamos a aportar una cantidad de calorías al sistema las cuales no se podrá modificar. Por otro lado, el medio por el cual se transportará esta energía es el aire, y podemos controlar el flujo masico de este, variando la velocidad del motor.

Si el controlador decide reducir flujo del aire estaremos impidiendo que el aire atraviese toda la masa del arroz desde su parte interior hasta su parte exterior, lo cual impediría un secado uniforme y ocasionaría inconvenientes.

Para que este sistema sea implementado se requiere una inversión muy por encima de lo que se planifica en este proyecto debido al uso de un variador de velocidad el cual tiene un rubro bastante elevado en el mercado además de los costos que implica la parametrización del mismo.

### **2.9. Sistema de aire constante con válvula gas proporcional**

Para generar la temperatura de secado que deseamos tener para el proceso, vamos a necesitar un ventilador que haga circular el aire (convección forzada), un quemador de GLP que genere las calorías necesarias para inyectar al sistema el calor requerido para secar el arroz en cáscara y una válvula proporcional que me permita controlar el flujo de GLP y de esta forma controlar las calorías generadas, con la finalidad de alcanzar la temperatura deseada.

Ahora bien, para alcanzar dicha temperatura también podríamos variar el flujo másico de aire controlando el ventilador con un variador de frecuencias pero el costo de una válvula proporcional para gas GLP es muy inferior al costo de un variador de velocidad, lo cual nos dirige a tomar la decisión de emplear la válvula proporcional en proyecto para tratar de abaratar costos y pensando a futuro ya que resultará más económico y tomará menos tiempo reemplazar una válvula proporcional que un variador de frecuencia con toda la parametrización que esto implica.

## 2.10. Función de transferencia del sistema

### 2.10.1. Modelos agrupados de sistemas térmicos

Los modelos matemáticos de los sistemas térmicos se obtienen de la ecuación de energía de sistema.

$$E_a = E_{in} - E_{out} + E_{gen} \quad (2.12) [20]$$

$E_a$ : Energía almacenada en el sistema.

$E_{in}$ : Energía que ingresa al sistema.

$E_{out}$ : Energía que sale del sistema.

$E_{gen}$ : Energía que se genera dentro del sistema.

Para el sistema que vamos a analizar, la ecuación 2.12 toma la forma de:

$$\rho_{(t)} C_{p(t)} V \frac{dI'}{dt} = Q_{in(t)} - Q_{out(t)} + Q_{ins(t)} + \frac{dW}{dt} \quad (2.13) [20]$$

$\rho_{(t)}$ : Densidad específica del arroz en cáscara.

$C_{p(t)}$ : Calor específico del arroz en cáscara.

$V$ : Volumen del producto.

$Q_{in(t)}$ : Calor que fluye hacia el arroz en cáscara.

$Q_{out(t)}$ : Calor que fluye fuera del arroz en cáscara.

$Q_{ins(t)}$ : Calor generado dentro del arroz en cáscara.

$\frac{dW}{dt}$ : Tasa de trabajo realizado dentro del el arroz en cáscara.

De la ecuación (2.13) se sabe que  $Q_{in}(t)$  es el calor que entra al sistema por medio del aire que es calentado por el quemador, como se considera que el calor de entrada no se disipa por las paredes de la planta,  $Q_{in}(t)$  es el calor neto de entrada.  $Q_{out}(t)$  representa el calor de salida del sistema, es decir, es el calor que sale por conducción, a través del arroz.  $Q_{ins}$  representa calor generado dentro del sistema, pero como arroz en cascara no genera calor, además no se está realizando trabajo mecánico del arroz hacia el sistema,  $Q_{ins}(t) = 0$  y  $\frac{dW}{dt} = 0$ .

La ecuación que describirá el comportamiento del sistema térmico, luego de lo explicado es.

$$\rho C_p V \frac{dT}{dt} = Q_{in}(t) - Q_{out} \quad (2.14)$$

Donde reemplazando  $Q_{out}$  es el calor que fluye por conducción a través del arroz en cascara y se define como:

$$Q_{out} = \left(\frac{kA}{L}\right) (T - T_a) [kcal] \quad (2.15)$$

k: Conductividad térmica.

A: Área de contacto con el aire.

L: Espesor de la pared de arroz dentro del contenedor.

T: Temperatura de aire interior del cilindro.

T<sub>a</sub>: Temperatura externa del recipiente.

La ecuación resultante de reemplazar (2.15) en (2.14).

$$\rho C_p V \frac{dT}{dt} = Q_{in}(t) - \left(\frac{kA}{L}\right) (T - T_a) \quad (2.16)$$

Realizando un remplazo de variable para facilidad de manipulación matemática.

$$T1 = (T - T_a), T_a \text{ es contante. } [^\circ C] \quad (2.17)$$

Sus respectiva derivada para completar el proceso de cambio de variable.

$$\frac{dT1}{dt} = \frac{dT}{dt} \quad (2.18)$$

Aplicando transformada de Laplace a la ecuación (2.16).

$$\mathcal{L}\left\{\rho C_p V \frac{dT_1}{dt} = Q_{in}(t) - \left(\frac{kA}{L}\right) (T_1)\right\} \quad (2.19)$$

Desarrollamos y obtenemos la función que desarrollaremos en MATLAB - Simulink.

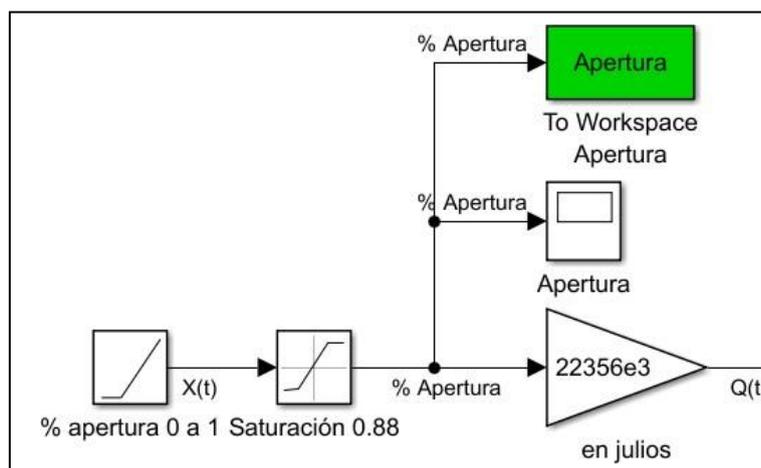
$$T_1(s) = \frac{Q_{in}(s) - \left(\frac{kA}{L}\right) T_1}{\rho C_p V s} \quad [^{\circ}C] \quad (2.20)$$

### 2.10.2. Función de la electroválvula y la campana de calor

La relación de estos dos elementos es lineal y se encuentra descrita por la siguiente ecuación.

$$Q_{in}(t) = 22356 * 10^3 * X(t) \quad (2.21)$$

$X(t)$ : Proporción de apertura (0 - 0,88).



**Figura 2.5 Representación en diagrama de bloques de la electroválvula Simulink – MATLAB.**

### 2.10.3. Función de humedad en equilibrio

Empleamos la ecuación de Henderson y Thompson modificada que relaciona la temperatura que se debe aplicar para obtener una determinada humedad en equilibrio.

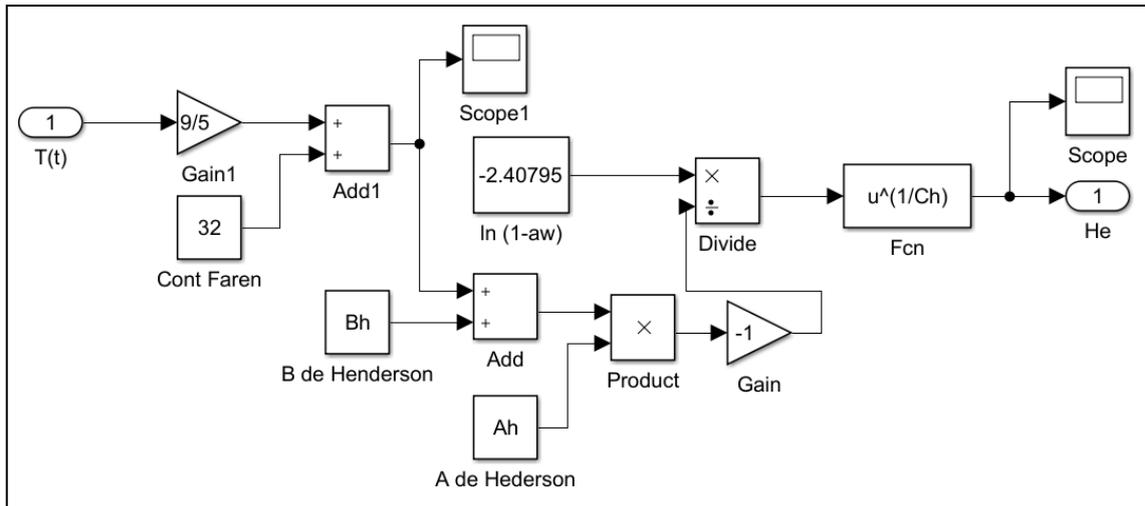
$$H_e = \left[ \frac{\ln(1 - Hr)}{-A * (T + B)} \right]^{\frac{1}{C}} \quad (2.22)$$

Hr: Humedad relativa del arroz en cáscara a temperatura ambiente.

A, B, C: Constantes adimensionales de la función de difusividad.

T: Temperatura de aire interior del cilindro.

$H_e$ : Humedad en equilibrio.



**Figura 2.6 Representación en diagrama de bloques de la función de la humedad en equilibrio Simulink – MATLAB.**

Despejando la variable de Temperatura tenemos que.

$$T = \frac{\ln(1 - Hr)}{-A * H_e^C} - B \quad (2.23)$$

Para el proceso de secado de arroz en cascaras, los experimentos muestran que las constantes A, B y C tiene los siguientes valores. [21]

**Tabla 2.5 Constantes de los modelos para las isotermas de desorción. [21]**

	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
<b>Modificada de Henderson</b>	2,160* 10 <sup>-4</sup>	25,5338	1,632

Además, la variable  $Hr$  es la humedad relativa a la temperatura ambiente de cosecha del arroz en cáscara que es de 0.704.

#### 2.10.4. Función de humedad en el tiempo

Debido a la variación de la humedad por diferentes factores se emplea la ecuación (2.24) de relación de humedad  $RH$ . Teniendo como referencia el valor de humedad inicial  $H_o$  y sabiendo que con el tiempo el contenido de humedad en equilibrio  $H_e$  será insignificante al comparar con el contenido de humedad en cada instante  $H_w(t)$ . [22]

$$RH = \frac{H_w(t) - H_e}{H_o - H_e} \quad [Adimensional] \quad (2.24)$$

La ecuación que describe la difusión para una esfera isotrópica, asumiendo que es la forma geométrica que más se aproxima al grano de arroz con cáscara con coeficiente de difusión constante y cuando el tiempo de secado es grande. [23]

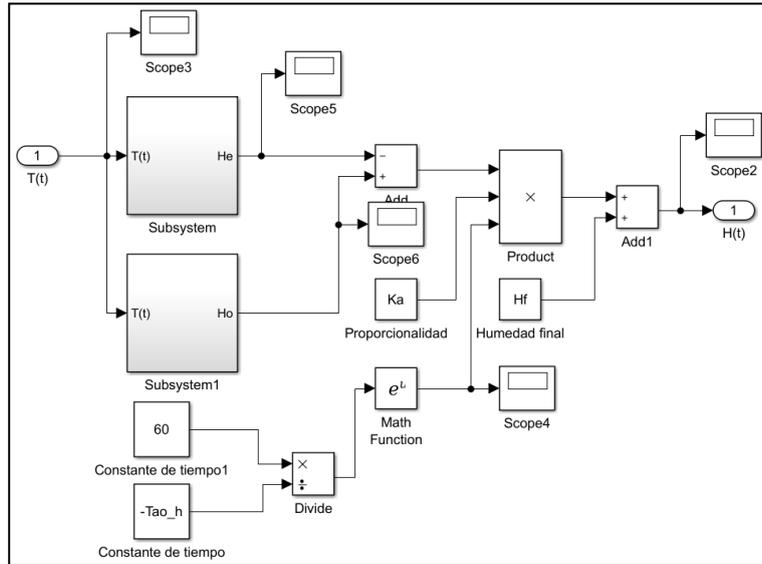
$$\frac{H_w(t) - H_e}{H_o - H_e} = \frac{6}{\pi^2} * e^{-\left(\frac{\pi^2 Def * t * 60}{Ra^2}\right)} \quad [Adimensional] \quad (2.25) [23]$$

$Def$ : Difusividad efectiva del arroz en cáscara (1.6).

$Ra$ : Radio del grano de arroz en cáscara.

Despejando  $H_w(t)$  de la ecuación (2.25) tenemos la ecuación de humedad en función del tiempo.

$$H_w(t) = (H_o - H_e) * \frac{6}{\pi^2} * e^{-\left(\frac{\pi^2 Def * t * 60}{Ra^2}\right)} + H_e \quad [Adimensional] \quad (2.26)$$



**Figura 2.7 Representación en diagrama de bloques de la función de la humedad en el tiempo Simulink – MATLAB.**

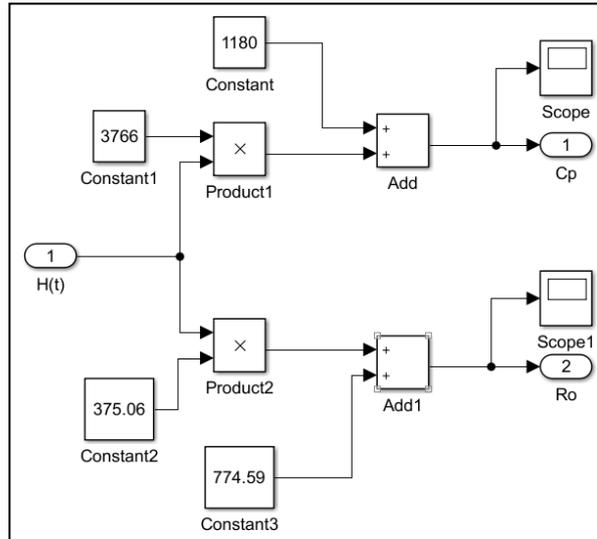
Para poder relacionar la ecuación (2.20) con la ecuación (2.26) emplearemos las ecuaciones de calor específico, densidad y la conductividad térmica en función de la humedad que varía con el tiempo.

Calor específico del arroz en cáscara en función de la humedad.

$$Cp(H_w(t)) = 1180 + 3766 * H_w(t) \quad \left[ \frac{J}{kg K} \right] \quad (2.27) [21]$$

Densidad específica del arroz en cáscara en función de la humedad.

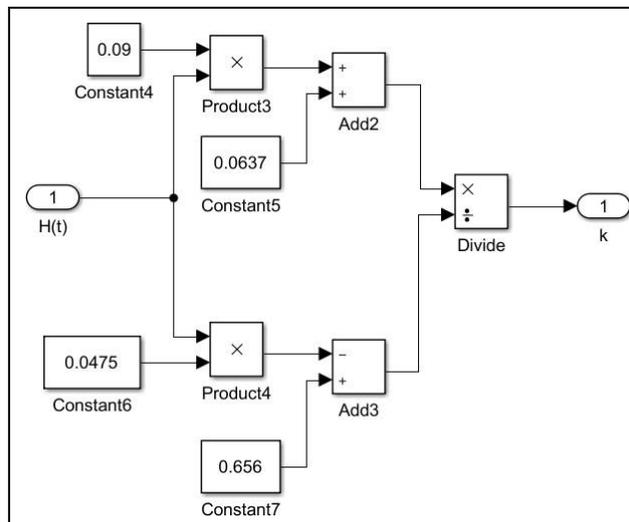
$$\rho(H_w(t)) = 0.532 * (1456 + 708 * H_w(t)) \quad \left[ \frac{kg}{m^3} \right] \quad (2.28) [21]$$



**Figura 2.8 Representación en diagrama de bloques de la densidad específica del arroz en cáscara en función de la humedad Simulink – MATLAB.**

Conductividad térmica del arroz en cáscara en función de la humedad.

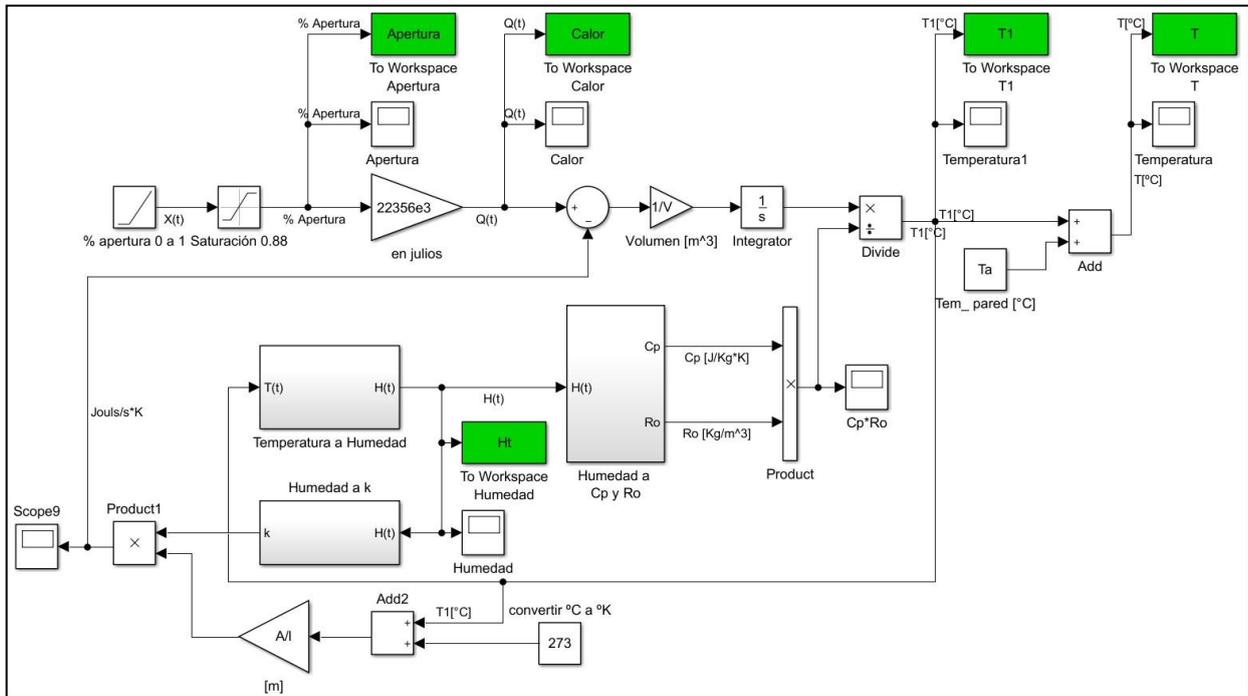
$$k(H_w(t)) = \frac{0.0637 + 0.9 * H_w(t)}{0.656 - 0.0475 * H_w(t)} \left[ \frac{W}{m K} \right] \quad (2.29) [21]$$



**Figura 2.9 Representación en diagrama de bloques de la Conductividad térmica del arroz en cáscara en función de la humedad Simulink – MATLAB.**

## 2.10.5. Función de transferencia de la Planta

Tomando en cuenta la ecuación (2.16) se desarrolló la representación completa del sistema que describe el comportamiento de la planta mediante los tipos de calor empleados.



**Figura 2.10 Representación en diagrama de bloques de la función de planta en Simulink – MATLAB.**

Para determinar la función de planta empleamos la herramienta de System Identification – MATLAB donde definimos la entrada Apertura que es la proporción de apertura de la válvula y la salida T que es la temperatura en el sistema.

Definimos una función de orden uno, por lo tanto, ubicamos un polo y ningún cero para la identificación que realizamos, obteniendo la función de transferencia.

$$G(s) = \frac{0.1581}{s + 0.002858} \quad (2.30)$$

## 2.10.6. Diseño del controlador

Para este procedimiento empleamos la herramienta de Sisotool – MATLAB, donde ingresamos la función de transferencia (2.30) donde nos permite obtener el lugar geométrico de las raíces de manera dinámica.

Aquí empleamos la opción de PID Tuning donde configuramos para obtener un controlador PI requerido para el proyecto. De esta manera y ajustando el tiempo de respuesta y transiente para esta función obtuvimos el controlador más eficiente para el proceso.

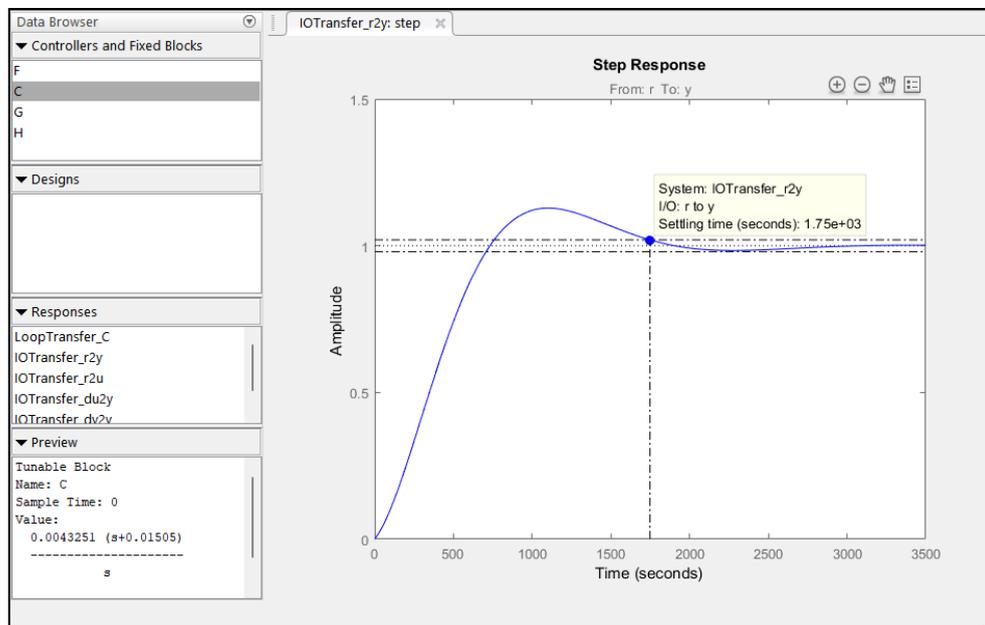


Figura 2.11 Respuesta más eficiente del controlador PI.

$$G(s) = \frac{0.0043251 * (s + 0.01505)}{s} \quad (2.31)$$

## 2.11. Controlador del sistema

De los diferentes tipos de PLC, se plantea la selección del SIEMENS S7-1200 con un procesador 1214c. Debido a la versatilidad aplicada en el control de PI de acuerdo con los sensores planteado en el proyecto y el costo adquisitivo que tiene el dispositivo.



**Figura 2.12 PLC S7-1200 CPU 1214c AC/DC/RLY**

**Tabla 2.6 Características del controlador**

<b>Características</b>	<b>Valores</b>
Paquete de programación	STEP 7 V11.0 SP2 o superior
Rango admisible, límite inferior (AC)	85 V
Rango admisible, límite superior (AC)	264 V
Consumo (valor nominal)	100 mA @ 120 VAC 50 mA @ 240 VAC
Tipo de interfaz	PROFINET
Norma física	Ethernet
Rango de temperatura permitido	-40 °C a +70 °C

## **2.12. Equipos de comunicación**

Para el tema de comunicaciones entre una estación de monitoreo y la planta de secado de arroz emplearemos un dispositivo de comunicación con tecnología inalámbrica LORA, donde se emplea un tipo de modulación en radiofrecuencia.

Estos dispositivos tienen alta tolerancia a las interferencias, alta sensibilidad para recibir datos, alrededor de (-168dB) y una distancia de alcance total de 10 km a 20 km y estos dispositivos tienen un costo inferior a un sistema de comunicación inalámbrica industrial que es mucho más costoso y nuestro fin aplicativo no lo amerita.

### 2.12.1. LORA a Ethernet LR-201-E

En este caso usamos una pasarela para poderte tener comunicación entre el dispositivo de control el cual emplea conexión Ethernet, y así, poder tener la salida a LORA.



**Figura 2.13 Convertidor LoRa a Ethernet/USB modelo LR-201-E**

**Tabla 2.7 Características de la pasarela. [24]**

Características	Valores
Herramientas de configuración	Utilidad de Windows
Potencia	9 a 24 [V] / 150 [mA] a 60 [mA]
Luz LED	SYS (Verde), Rx (Rojo), Tx (Verde)
Temperatura de funcionamiento	-10 [°C] a 70 [°C]
Temperatura de almacenamiento	-20 [°C] a 80 [°C]
Dimensiones	100 x 90 x 25 [mm] (Ancho x profundidad x alto)
Peso	150 [mg]

### 2.12.2. Topología del sistema comunicación

Dentro del sistema del proyecto definimos la topología de comunicación para poder mantener una conexión del proceso de la planta a distancia desde el cuarto de control, para esto mantenemos una comunicación con una computadora de características básicas. Un CPU Dual Core con una RAM de 4GB, 250GB de disco sólido y con capacidad de resolución de 800 x 600. [25]



**Figura 2.14 Topología de red de comunicación del sistema SCADA**

### 2.13. Sensores

En el sistema de control está basado en la temperatura, es por ello la necesidad de emplear un dispositivo que cense esta unidad. Seleccionamos un sensor PT100, elemento de fácil acceso, de uso muy común y bajo costo.



**Figura 2.15 Sensor de temperatura resistivo PT100**

**Tabla 2.8 Características Técnicas del sensor de temperatura PT100. [26]**

<b>Características</b>	<b>Valores</b>
Tolerancia	$\pm 0,15 \text{ }^\circ\text{C}$ a $0 \text{ }^\circ\text{C}$
Rango de medida	-50 a $400 \text{ }^\circ\text{C}$
Resistencia a la presión	máx. 40 bar
Longitud de montaje	100 mm
Diámetro de la sonda	6 mm
Material de la sonda	Acero inoxidable
Material de la carcasa	Aluminio

# CAPÍTULO 3

## 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 3.1. Caso de estudio

Actualmente, los sistemas de secado de arroz empleados por los agricultores requieren recursos elevados o de tiempo prolongado para este procedimiento. En base a la simulación desarrollada que emula el comportamiento del equipo diseñado, en lazo abierto, donde se observa la humedad presente en el grano a medida que se inyecta de calor a la planta, obtenemos tablas de resultados que nos permiten predecir el comportamiento de la humedad del sistema, para con ello implementar un controlador PI en lazo cerrado y así lograr reducir el tiempo y los costos gracias a un sistema de secado con control automático que logra mantener la temperatura constante durante el tiempo de secado del producto, esto nos permite obtener un arroz con la humedad suficientemente baja para que este pueda ser almacenado y comercializado a un mejor precio en los centros de acopio.

### 3.2. Pruebas de simulación

#### 3.2.1. Respuesta de calor en función de la apertura de válvula

Realizamos la representación por medio de una gráfica en relación del calor que se obtiene a medida que varía la apertura de la válvula como se observa en la Figura 3.1.

**Figura 3.1 Calorías generadas por el quemador en función del porcentaje de apertura de la válvula.**

Como primer punto analizamos la cantidad de calor que genera el quemador. En la hoja de datos nos dice que el quemador puede producir hasta un máximo de 2500 kcal cuando tenemos un 100% de apertura de la válvula, en la imagen de la simulación constatamos que las kcal que se generan al 90% de la válvula abierta es de 2000kcal, lo tomamos como dato aceptable ya que en la practica la válvula que seleccionamos puede hacer que el quemador trabaje al 88% del máximo de su poder.

**3.2.2. Respuesta de humedad con respecto a la temperatura**

Realizamos la representación por medio de una gráfica en relación del porcentaje de humedad en relación con la temperatura como se observa en la Figura 3.2.

**Figura 3.2 Comportamiento de la Humedad en el grano en función de la temperatura aplicada.**

Para poder analizar lo que ocurre con la humedad en el sistema, usaremos la Tabla 3.1 tomada de la simulación del sistema en MATLAB.

**Tabla 3.1 comportamiento de humedad vs temperatura sin controlador.**

Humedad	Temperatura [°C]
21,20	25,00
21,20	25,00
20,46	26,24
19,94	27,27
19,54	28,19
19,10	29,32
18,64	30,69
18,41	31,48
18,18	32,34
17,95	33,28
17,72	34,29
17,50	35,38
17,29	36,55

Humedad	Temperatura [°C]
17,08	37,81
16,89	39,14
16,70	40,55
16,52	42,04
16,36	43,61
16,20	45,26
16,06	46,99
15,92	48,78
15,80	50,65
15,68	52,60
15,57	54,61
15,47	56,69

Mientras se aumenta la temperatura aplicada al sistema, se reduce el porcentaje de humedad en el grano. Nuestra temperatura setpoint de secado del arroz en cascara es de 55°C, podemos notar en la tabla que, a esta temperatura, la humedad en el grano está alcanzando un 15%, recordando que nuestro valor objetivo era de 14% obtenemos lo siguiente.

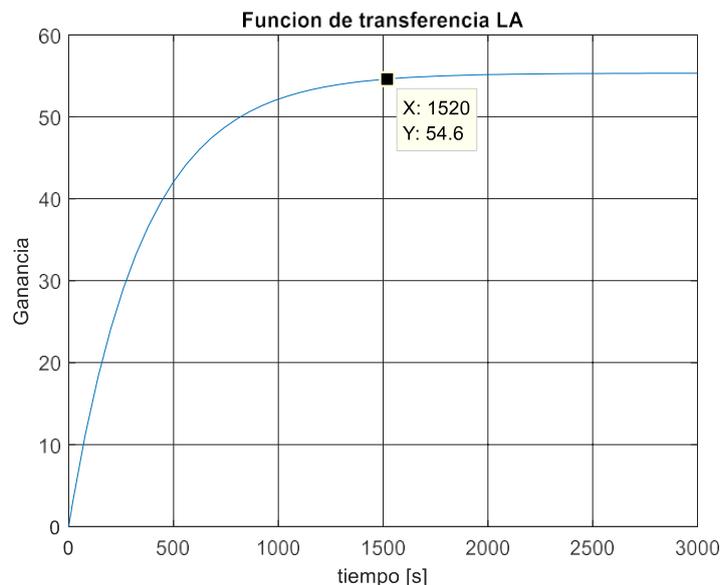
$$\% \text{ error} = \frac{|15,47 - 14|}{15,47} * 100$$

$$\% \text{ error} = 9.5\%$$

Lo que nos representa un error bastante alto que podemos corregir con el controlador PI como veremos más adelante.

### 3.2.3. Función de transferencia de la planta en lazo abierto

Realizamos la representación gráfica de la función de planta, considerando la temperatura como salida y el porcentaje de apertura como entrada, como se observa en la Figura 3.3.



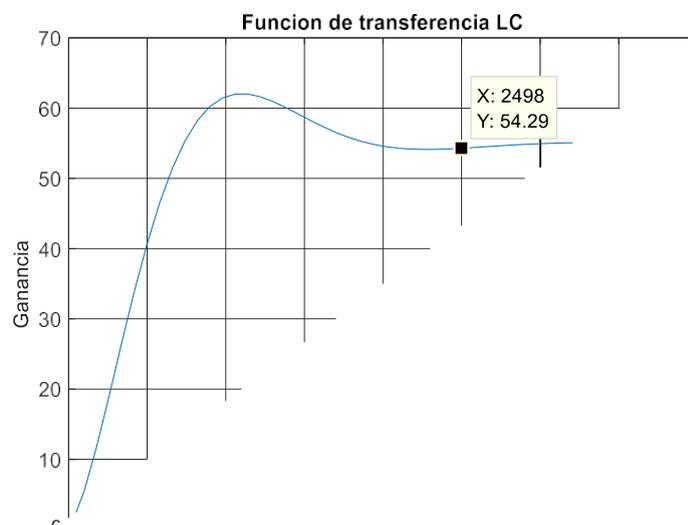
**Figura 3.3 Función de Transferencia del sistema en lazo abierto.**

La respuesta del sistema en lazo abierto nos dice que el tiempo de estabilización es de 25 minutos con 33 segundos, pero la bibliografía nos dice que calentar el arroz

rápidamente provoca que este se fragmente, por ello debemos ajustar el tiempo de estabilización a con la ayuda del controlador para garantizar un secado óptimo que nos permita obtener la mayor cantidad de beneficio posible.

### 3.2.1. Función de transferencia de la planta en lazo cerrado

Realizamos la representación gráfica de la función de planta, considerando la temperatura como salida y el porcentaje de apertura como entrada y aplicado el controlador diseñado, como se observa en la Figura 3.4.



**Figura 3.4 TF del sistema en lazo cerrado.**

Con el controlador logramos obtener un tiempo de estabilización de 41 minutos con 30 segundos, de antemano sabíamos que alcanzar la temperatura de secado a un tiempo alrededor de los 40 minutos garantiza un secado óptimo en el grano. Además, con el controlador logramos reducir la humedad del sistema a 14.65% lo que reduce también el error del porcentaje de humedad final como vemos a continuación con la ayuda de la tabla de datos obtenida de la simulación en MATLAB.

**Tabla 3.2 comportamiento de humedad vs temperatura con controlador PI.**

Humedad	Temperatura [°C]
21,038	24,07
20,856	28,99
20,741	33,14
20,610	36,64
20,464	39,58
20,304	42,06
20,131	44,15
19,945	45,91
19,748	47,39
19,540	48,64
19,325	49,69
19,102	50,58
18,874	51,33
18,642	51,96
18,410	52,49
18,177	52,93
17,947	53,31
17,721	53,62
17,501	53,89
17,287	54,12
17,082	54,31
16,886	54,47
16,700	54,60
16,524	54,71

Humedad	Temperatura [°C]
16,358	54,81
16,203	54,89
16,058	54,96
15,922	55,01
15,796	55,06
15,679	55,10
15,571	55,14
15,470	55,16
15,377	55,19
15,290	55,21
15,210	55,23
15,136	55,24
15,068	55,25
15,004	55,26
14,945	55,27
14,909	55,28
14,909	55,29
14,909	55,29
14,857	55,30
14,810	55,30
14,767	55,30
14,727	55,30
14,691	55,31
14,658	55,31

Finalmente, el error obtenido es el siguiente.

$$\% \text{ error} = \frac{|14.65 - 14|}{14.65} * 100$$

$$\% \text{ error} = 4.43\%$$

Con lo que demostramos que el controlador PI en el proceso de secado es una buena opción ya que nos ayuda a reducir el error en el porcentaje de humedad final del sistema.

### 3.3. Costos

Con la finalidad de estimar un costo fijo para el sistema de la secadora de arroz, se realiza una lista de los elementos a ser utilizados para el caso de estudio definido en la sección 3.1. Al ser el diseño de un solo equipo el análisis que realizaremos será unitario.

En la Tabla 3.3 se representa el listado de los materiales y procesos estructurales que se requieren para el desarrollo del equipo por completo.

**Tabla 3.3 Costos de los elementos para el desarrollo del equipo**

Componente	Unidad	Precio unitario	Subtotal
PLC s71200- 1214c ac/dc/rly	1	1198.39	1198.39
Pt100	2	141.30	282.60
Transmisor de temperatura	2	49.50	99.00
Motor blower	1	1829.99	1829.99
Contactador	1	45.55	45.55
Botoneras	2	33.50	67.00
Paro de emergencia	1	22.50	22.50
Válvula de gas	1	18.20	18.20
Estructura y soldadura	1	700	700
Programación	1	1200	1200
Quemador	1	450.80	450.80
Antena LoRa	1	119.90	119.90
Materiales varios	1	500	500
		<b>TOTAL</b>	<b>6533.93</b>

#### 3.3.1. Inversión

Para el presente trabajo definiremos el tipo de inversión como inversión de crecimiento debido a que los agricultores implementarían este sistema como en su innovación en su microempresa.

En la Tabla 3.4 se presenta los costos totales requerido para la instalación de sistema de secado de arroz.

**Tabla 3.4 Costo final del proyecto en función del número de equipos**

Plantas	Mecánica	Automatización	Parte eléctrica	Subtotal	Logística y mano de obra 20%	TOTAL
1	1669.00	2899.89	1965.04	6533.93	1306.79	7840.72

Finalmente, el valor total de equipo puede variar en relación con el lugar donde se lo requiera y la accesibilidad que se tenga a donde se la desea instalar, esto implicaría un incremento en los costos de logística.

### 3.3.2. Retorno de inversión

Para desarrollar debemos analizar el costo que repercute el secado teniendo la planta propia como lo podemos observar en la Tabla 3.5.

**Tabla 3.5 Tabla de costos comparativos de los tipos de secado**

Por secado	Secado Artesana	Secado Alquilado	Secado Propio
<b>Tiempo Secado</b>	40 horas	12 horas	6 horas
<b>Cantidad</b>	17 sacos (220 lbs)	17 sacos (220 lbs)	17 sacos (220 lbs)
<b>Costo</b>	\$ 96,00	\$47,60	\$14,05

Al realizar un análisis en la Tabla 3.6 determinamos que el valor de ahorro comparando en tener el equipo y alquilar para secar el mismo arroz, nos percatamos que representa un valor de \$177,22 USD en cada cosecha de 4,50 Ha de arroz que en promedio se realizan 2 en un año.

**Tabla 3.6 Tabla de rentabilidad con uso del equipo**

<i>Producido</i>	Ingresos	Gastos	Ganancia
<b>4,50 Ha de arroz Equipo propio</b>	\$ 1575,00	\$960,94	\$614,06
<b>4,50 Ha de arroz Equipo alquilado</b>	\$ 1575,00	\$1138,16	\$436,84
		<b>Ahorro</b>	\$177,22

En la Tabla 3.7 podemos observar que si el agricultor que posee el equipo alquila a una persona generando un rubro extra, este valor sería de \$87,02 USD por secada.

**Tabla 3.7 Rentabilidad con uso propio y alquiler**

<i>Alquiler</i>	Ingresos	Gastos	Ganancia
<b>Secado 45 Sacos (1 agricultor)</b>	\$ 124,21	\$37,19	\$87,02

Sabiendo que incrementado al ahorro que se definió en la Tabla 3.6 y al sumar la ganancia por alquiler definida en la Tabla 3.7, obtenemos el valor de ganancia producida por el equipo que lo podemos observar en la Tabla 3.8.

**Tabla 3.8 Utilidad neta producida por el equipo**

	<b>Ahorro</b>	<b>Ganancia Alquiler</b>	<b>TOTAL</b>
<b>Utilidad producida por el equipo por cada cosecha</b>	\$ 177,22	\$87,02	\$264,24

Finalmente, el periodo de retorno de inversión para los agricultores se estima en 5 años, suponiendo que el equipo es alquilado a 5 agricultores y que se realizan 2 cosechas en el año.

# CAPÍTULO 4

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1. Conclusiones

1. Se diseñó el sistema de secado en MATLAB partiendo desde la ecuación diferencial de balance de energía con la cual analizamos matemáticamente el calor que ingresa al sistema y el calor que sale del mismo.
2. La problemática que tuvimos al obtener el modelo fue conseguir las ecuaciones que relacionan la función de humedad del arroz en cascara en el tiempo respecto a la temperatura y como estaba relacionado el comportamiento de la temperatura en el sistema en función del calor que es generado por el quemador a gas.
3. Luego de indagar en experimentos y proyectos relacionados a nuestro tema, obtuvimos una función empírica matemática utilizada en la mayoría de los proyectos que describe el comportamiento aproximado en el proceso de secado de arroz utilizando convección forzada de aire caliente. Sumado a esto con las funciones de calor específico y densidad que dependen de la función de humedad, creamos un macrosistema que predice el comportamiento de una planta secado de arroz en cáscara ya que el modo de secado no depende de la forma de la planta sino solo de las propiedades del mismo arroz.
4. Realizamos la simulación del sistema en SIMULINK obteniendo una gráfica que representa el comportamiento de la humedad en función de la temperatura aplicada la cual comparamos con una tabla de puntos de humedad en equilibrio vs temperatura y observando que el comportamiento de ambas gráficas es aproximado.
5. Estos resultados los comparamos con el comportamiento real de plantas de secado de trabajos previos y vemos que los comportamientos que obtuvimos en la simulación son aceptables al comparar los puntos en equilibrio, además, analizando el error porcentual al obtener la humedad final, podemos concluir que el sistema diseñado en SIMULINK se comporta como la planta real por lo que el modelo matemático creado es aceptado.

6. Una vez diseñado el sistema en MATLAB- SIMULINK, con la ayuda de SISOTOOL calculamos el controlador que logra ajustar la respuesta del sistema al comportamiento de operación óptimo, obteniendo un tiempo de estabilización de 41 minutos y además la constante de tiempo y el tiempo integral del controlador PI, datos importantes para adjuntarlos a la programación del sistema en TIA PORTAL.
7. Además, utilizando el TIA PORTAL podemos definir un Gateway que nos permite transmitir los datos a través de protocolo industrial ETHERNET, utilizando las capas TCP/IP que nos permiten transmitir información por medio de la antena de comunicación LORA.
8. La programación del sistema creada en TIA PORTAL V16 podrá ser cargada a un PLC S71200 con CPU 1214c ac/dc/rly. Se utilizó este PLC ya que posee un bloque PID Compact que permite establecer el lazo de control y solo debo definir los parámetros de ganancia proporcional, tiempo integral y derivativo.

#### **4.2. Recomendaciones**

1. Para comprender el diseño simulado es necesario tener conocimientos previos de como diseñar una ecuación diferencial en SIMULINK.
2. Se debe tener en cuenta que el sistema diseñado en MATLAB-SIMULINK es un sistema ideal, por lo que no fueron consideradas las perturbaciones del medio.
3. A pesar de que el tiempo de secado se determinó en 6 horas, se deben realizar pruebas previas para determinar este tiempo, ya que puede variar con las condiciones ambientales, la cantidad de producto ingresado o la humedad inicial del arroz.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- [1 S. J. C. K. E. G. y. W. B. C. B. A. QUIJIJE, «Costo, volumen y Utilidad del cultivo de arroz, canton Samborondón.,» Guayaquil, ESPACIOS, 2019, p. 16.
- [2 M. D, U. S, C. R, C. M, P. P, A. D, L. R y A. R., «. Caracterización del sector arrocero en Ecuador 2014-2019: ¿Está cambiando el manejo del cultivo?,» *Alianza de Bioersivity Internacional y el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT)*, p. 58, 2021.
- [3 <https://www.traxco.es/blog>, «TRAXCO,» 9 JUNIO 2017. [En línea]. Available: <https://www.traxco.es/blog/produccion-agricola/cultivo-del-arroz#:~:text=Cosecha%20de%20arroz%20en%20el,20%2D24%25%20de%20humedad..> [Último acceso: 03 10 2022].
- [4 D. I. A. O. R. Pozzolo y I. A. H. J. Ferrari, «Arroz. Eficiencia de cosecha y Postcosecha,» Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Concepción del Uruguay, 2007.
- [5 R. J. AGUERRE, Artist, *Secado de arroz : Estudio de la cinética y de las variables que afectan la calidad del grano en la deshidratación [Tesis doctoral en ciencias químicas]*. [Art]. Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, 1984.
- [6 A. Orús, «STATISTA,» 28 JULIO 2022. [En línea]. Available: <https://es.statista.com/estadisticas/1130504/principales-paises-exportadores-de-arroz-en-el-mundo/>.
- [7 P. L. A. D. Bernardi, «PERFIL DEL MERCADO DE ARROZ,» 2017.
- [8 Virtual Group Expo, «AgriExpo,» [En línea]. Available: <https://www.agriexpo.online/es/prod/suncue/product-187741-129806.html>.
- [9 M. & M. C. Zeledón, «Efectos del secado continuo o en etapas y de la temperatura del aire sobre variables de rendimiento molinero en arroz producido en Costa Rica.,» *Agronomía Costarricense*, Costa Rica, 1992.
- [1 J. A. C. y. V. J. D. COTRINA, «DISEÑO DE UNA MÁQUINA SECADORA DE GRANOS DE ARROZ PORTÁTIL CON CAPACIDAD DE SILO DE 7M3 PARA LOS PEQUEÑOS PRODUCTORES ARROCEROS DE LA REGION LAMBAYEQUE-

PERÚ,» Rev. INGENIERÍA: Ciencia, Tecnología e Innovación, Lambayeque-Perú, 2021.

- [1 SolarPlak, «SolarPlak,» [En línea]. Available: <https://solarplak.es/energia/que-es-y-1-para-que-sirve-un-motor-asincrono/#:~:text=Para%20qu%C3%A9%20se%20utilizan%20los,a%20partir%20de%20energ%C3%ADa%20el%C3%A9ctrica..> [Último acceso: 02 11 2022].
- [1 P. electronics, «PR electronics,» [En línea]. Available: 2] <https://www.prelectronics.com/es/los-fundamentos-de-los-sensores-de-temperatura-rtd/>. [Último acceso: 10 12 2022].
- [1 Sicma21, «SICMA21,» 14 10 2021. [En línea]. Available: 3] <https://www.sicma21.com/que-es-un-plc/>. [Último acceso: 15 11 2022].
- [1 I. GLOSSAR, «Suche - item Glossar,» [En línea]. Available: 4] <https://glossar.item24.com/es/indice-de-glosario/articulo/item//controlador-pi-2.html>. [Último acceso: 12 02 2023].
- [1 U. D. BOSCO, «UNIVERSIDAD DON BOSCO,» 19 07 2017. [En línea]. Available: 5] [https://www.udb.edu.sv/udb\\_files/recursos\\_guias/electronica-ingenieria/sistemas-de-control-automatico/2019/iii/guia-5.pdf](https://www.udb.edu.sv/udb_files/recursos_guias/electronica-ingenieria/sistemas-de-control-automatico/2019/iii/guia-5.pdf). [Último acceso: 15 11 2022].
- [1 L. Focus Technology Co.. [En línea]. Available: [https://es.made-in-china.com/co\\_sunsrays/product\\_Gas-Burners-LPG-Gas-Burners-Industrial-Air-Burner\\_erhoshorg.html](https://es.made-in-china.com/co_sunsrays/product_Gas-Burners-LPG-Gas-Burners-Industrial-Air-Burner_erhoshorg.html). [Último acceso: 06 11 2022].
- [1 FENK, «FENK,» [En línea]. Available: 7] <http://www.fenk.com.ar/productos/otros/ventiladores-de-centrifugos/>. [Último acceso: 12 11 2022].
- [1 G. Salvi, La Combustión: Teoría y Aplicaciones. (2da edición), Madrid: Dossat, 1968. 8]
- [1 V. A. Ortiz-Bravo, M. A. Nieto-Arias, L. E. Avendaño-González y J. P., «Control algebraico de una esfera suspendida,» vol. 25, nº 01, p. 8, 2020.
- [2 J. f. G. J. L. S. Bohdan T. Kulakowski, «Dynamic Modeling and Control of Engineering 0] Systems,» New York, Cambridge, 2007, pp. (p.200 -p.226).
- [2 I. J. L. Fuentes, Artist, *Integridad Estructural en el Secado de Arroz en Lecho 1] Fluidizado*. [Art]. Universidad de los Andes., 2007.

- [2 K. C. y. S.-n. Thanapornpoonpong, Effect of Large-Scale Paddy Rice Drying Process  
2] Using Hot Air Combined with Radio Frequency Heating on Milling and Cooking  
Qualities of Milled Rice, Chiang Mai, 2022.
- [2 S. D. S. B. Ipsita Das, Drying kinetics of high moisture paddy undergoing vibration-  
3] assisted infrared (IR) drying, West Bengal, 2009.
- [2 tcpipweb, «tcpipweb,» [En línea]. Available: [https://www.tcpipweb.com/LR-201-4\] E.html](https://www.tcpipweb.com/LR-201-4] E.html). [Último acceso: 09 12 2022].
- [2 SIEMENS, WinCC: Información general e instalación, Guayaquil: Manuales de  
5] sistemas, 2022.
- [2 GRM, «GRM,» GRM Industrial, [En línea]. Available:  
6] <https://www.grm.com.es/es/producto/instrumentacion/temperatura/indicadores-de-temperatura/sonda-de-temperatura/>. [Último acceso: 10 12 2022].
- [2 S. J. C. K. E. G. y. W. B. C. B. A. QUIJIJE, «ESPACIOS,» de *Costo, volumen y  
7] Utilidad del cultivo de arroz, canton Samborondón*, 2019, p. p.16.
- [2 ABB, «Variadores de frecuencia,» 2022. [En línea]. Available:  
8] <https://new.abb.com/drives/es/que-es-un-variador#:~:text=Un%20variador%20de%20frecuencia%20por,de%20los%20requisitos%20del%20procedimiento..>
- [2 M. & D. A. Angulo, «Modelo generalizado para el estudio del motor de Inducción,»  
9] ingeniería energética, La Habana, Cuba, 2005.
- [3 CISTEMA - SURATEP S.A., «Programa CISTEMA SURATEP S.A.,» de  
0] *Almacenamiento en silos*, 2004, p. p.1.
- [3 C. OROZCO y F. BEDOYA, Artists, *CALCULO DEL FLUJO MÁSSICO Y CAUDAL DE  
1] AIRE PARA UN VENTILADOR UTILIZADO EN SILOS PARA SECADO PARA DEL CAFÉ*. [Art]. Universidad Tecnológica de Pereira, 2007.

# APÉNDICE

## APÉNDICE A



**Figura A. 1** Tendales de cemento y proceso de secado de arroz al aire libre.

# APÉNDICE B

## PROGRAMACIÓN EN MATLAB - SIMULINK

### MATLAB

```
%% constantes del sistema
hc=50;           %[W/m^2*K] constante de transferencia de calor por convección
A=1.88;         %[m^2] area lateral del cilindro interior
V=2.86;         %[m^3] volumen total del contenedor
l=0.7;          %[m] radio de la corona circular
Ta=25;          %[^K] temperatura de la pared exterior del arroz.
Tb=298;         %[^K] temperatuta ambiente.
k=0.138;        %[W/m*K] conductividad termica.
Hf=14;          % humedad final del sistema.
aw=0.704;       % humedad relativa al ambiente.
Ah=2.160e-4;    %constante A de Henderson
Bh=23.5338;     %constante B de Herdenson
Ch=1.632;       %constante C de Herdenson.
Ho=26;          % humedad inicial del arroz
Ka=0.7793;      %constante de proporcionalidad en la funcion de humedad
Tao_h=77.64;    % constante de tiempo de la funcion de humedad.
Tsimu=6000;
sim('new_sistem',Tsimu);

%% funcion de transferencia encontradas
sistema=tf([0.1581],[1 0.002858]); % funcion de transferencia del sistema
```

---

```
%% grafico de % de apertura vs Calor generado
```

```
figure(1)
plot(Apertura, Calor);
title('Qin Vs % de apertura');
xlabel('% de apertura');
ylabel('Qin [Calorias]');
grid on
```

---

```
%% grafico de Humedad vs Temperatura
```

```
figure(2)
plot(T,Ht);
title('Ht vs T');
xlabel('Temperatura [°C]');
xlim([25 90])
ylabel('Porcentaje de Humedad');
ylim([13 21])
grid on
```

---

```
%% sistema en lazo abierto
```

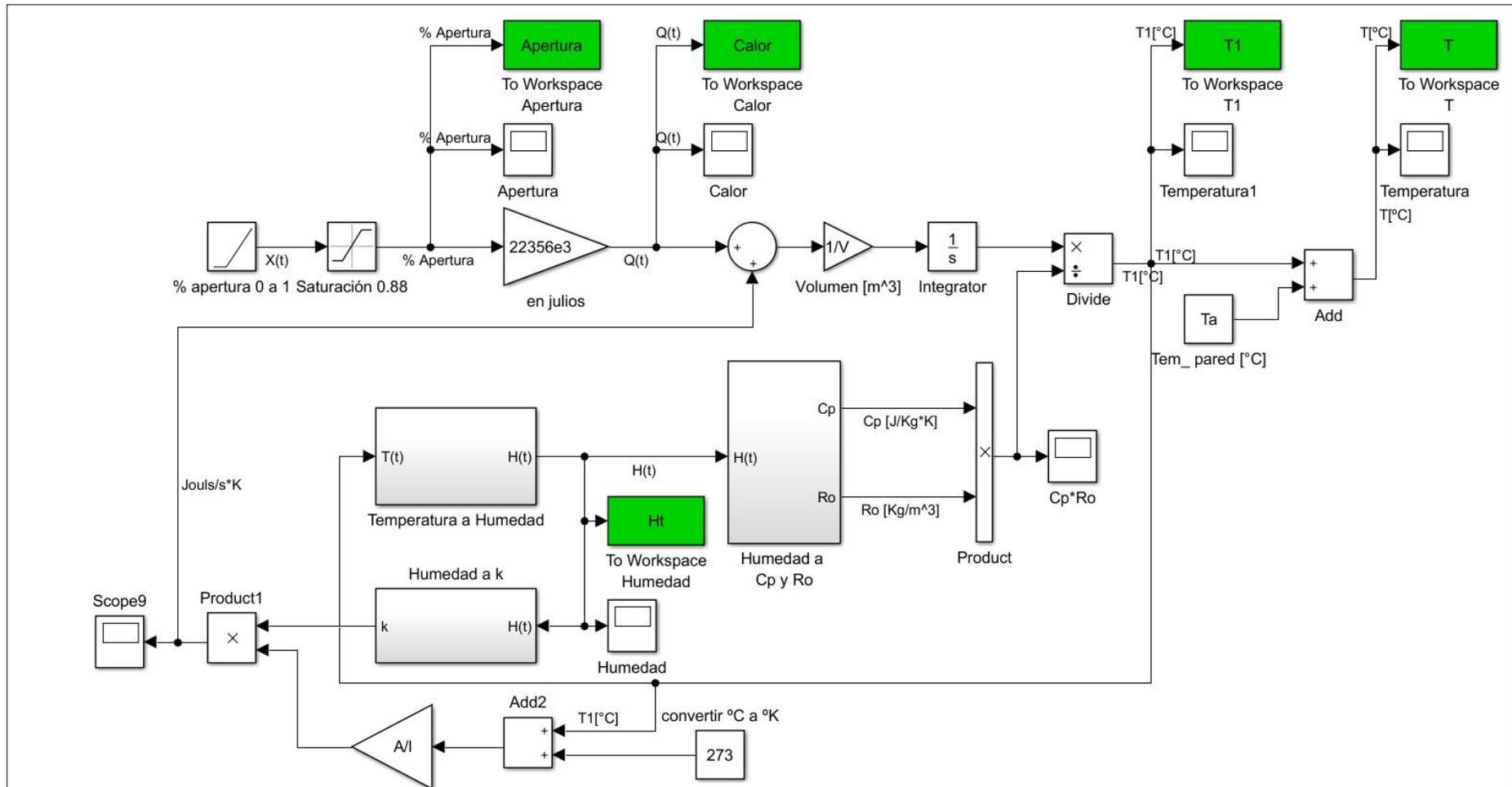
```
sim('RESPUESTA_LAZO_CERRADO',4000);
figure(3)
plot(tf_lazo_abierto(:,1),tf_lazo_abierto(:,2))
title('Funcion de transferencia LA');
xlabel('tiempo [s]');
ylabel('Ganancia');
grid on
```

---

```
%% sistema en lazo cerrado
```

```
figure(4)
plot(tf_lazo_cerrado(:,1),tf_lazo_cerrado(:,2))
title('Funcion de transferencia LC');
xlabel('tiempo');
ylabel('Ganancia');
grid on
```

## SIMULINK



**Figura B. 1** Sistema de secado con válvula proporcional.

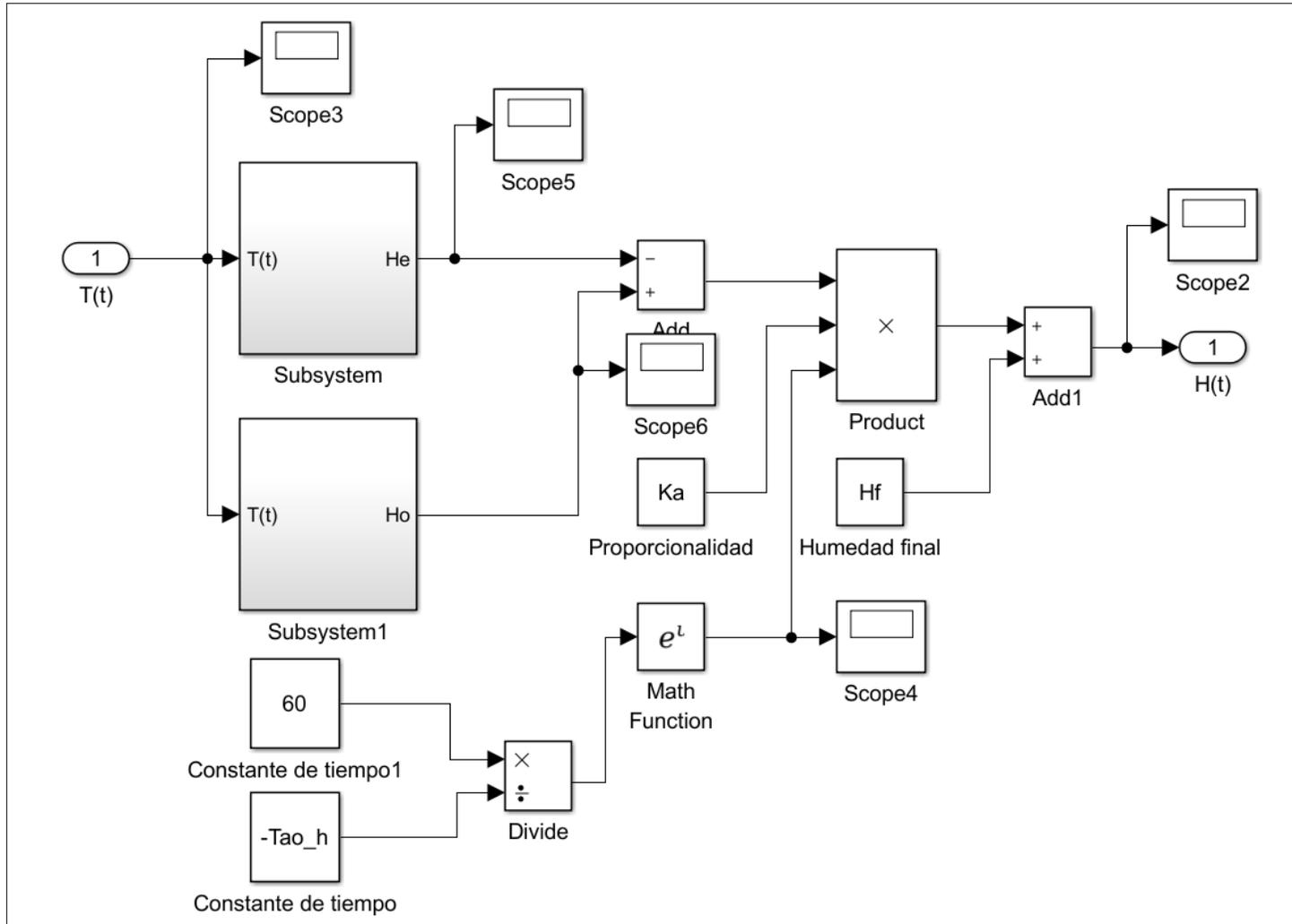
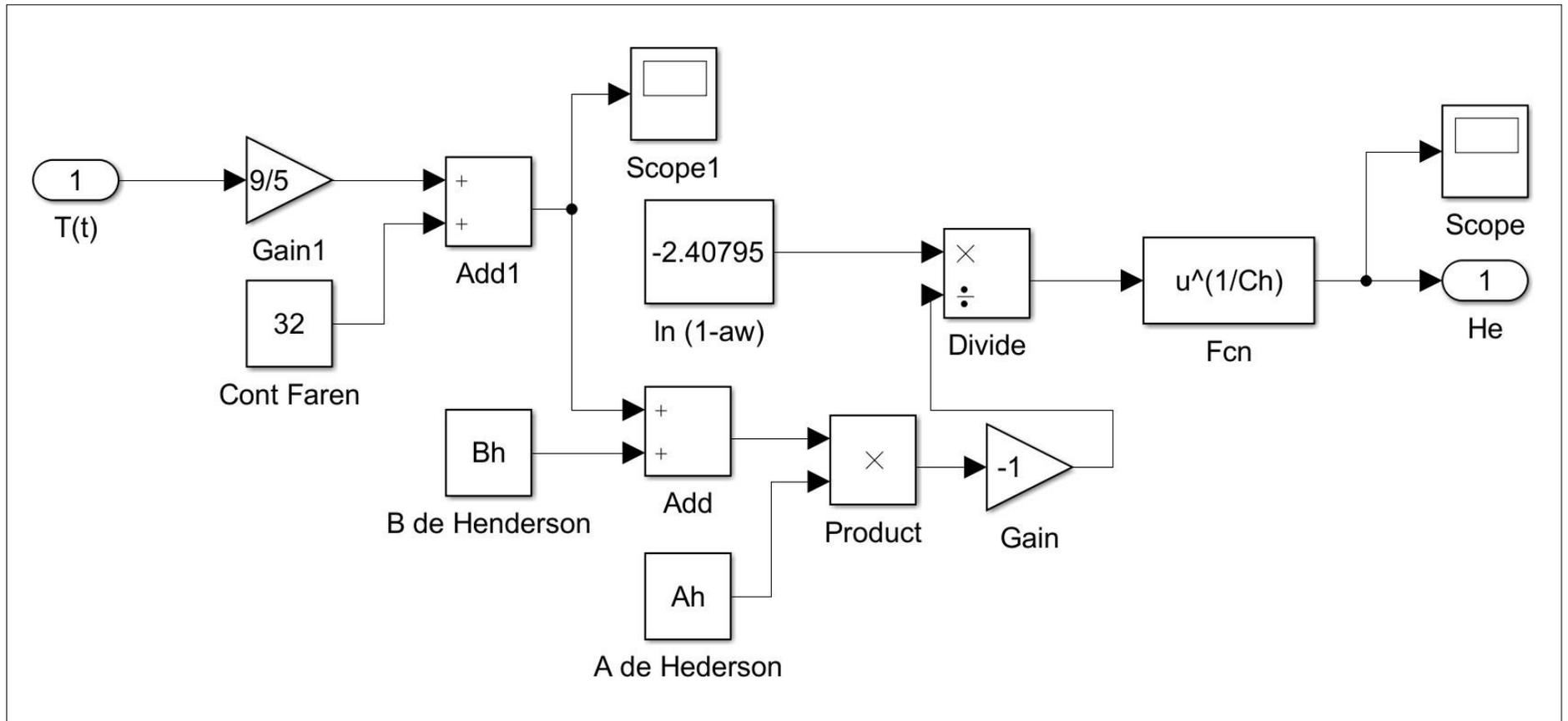
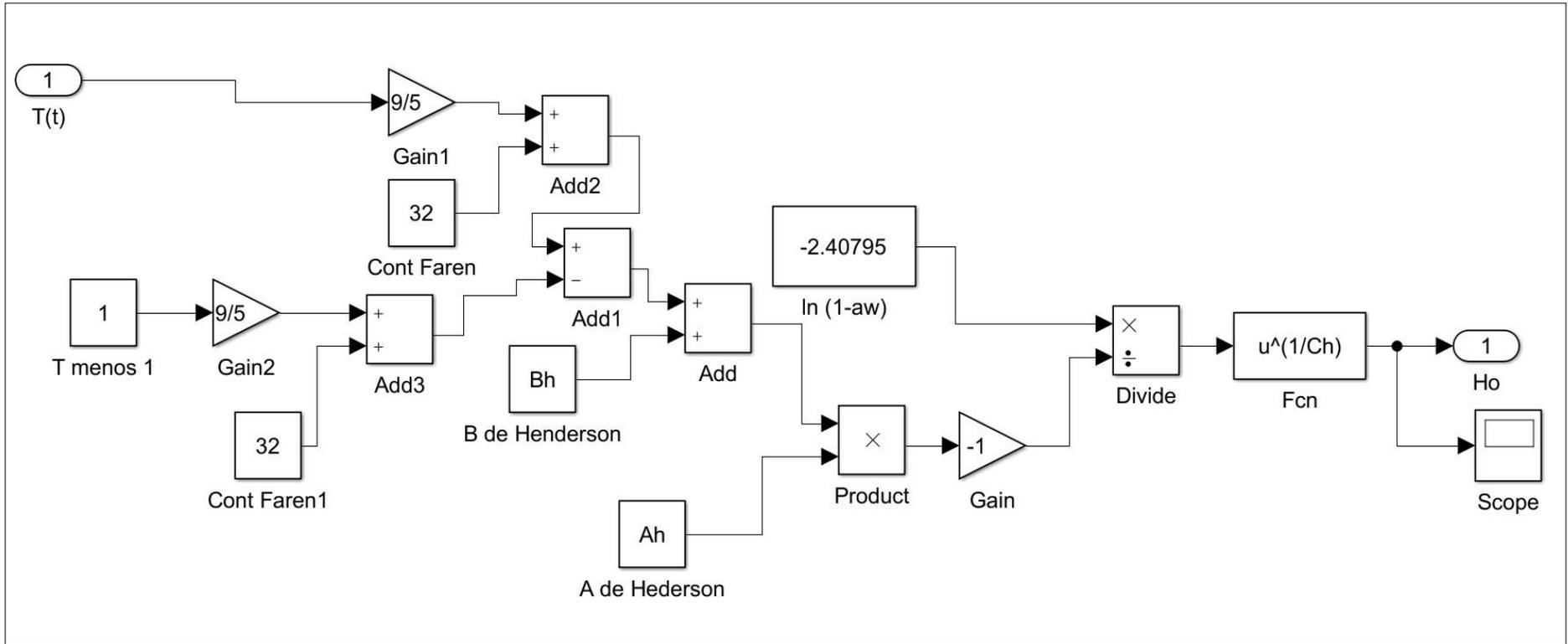


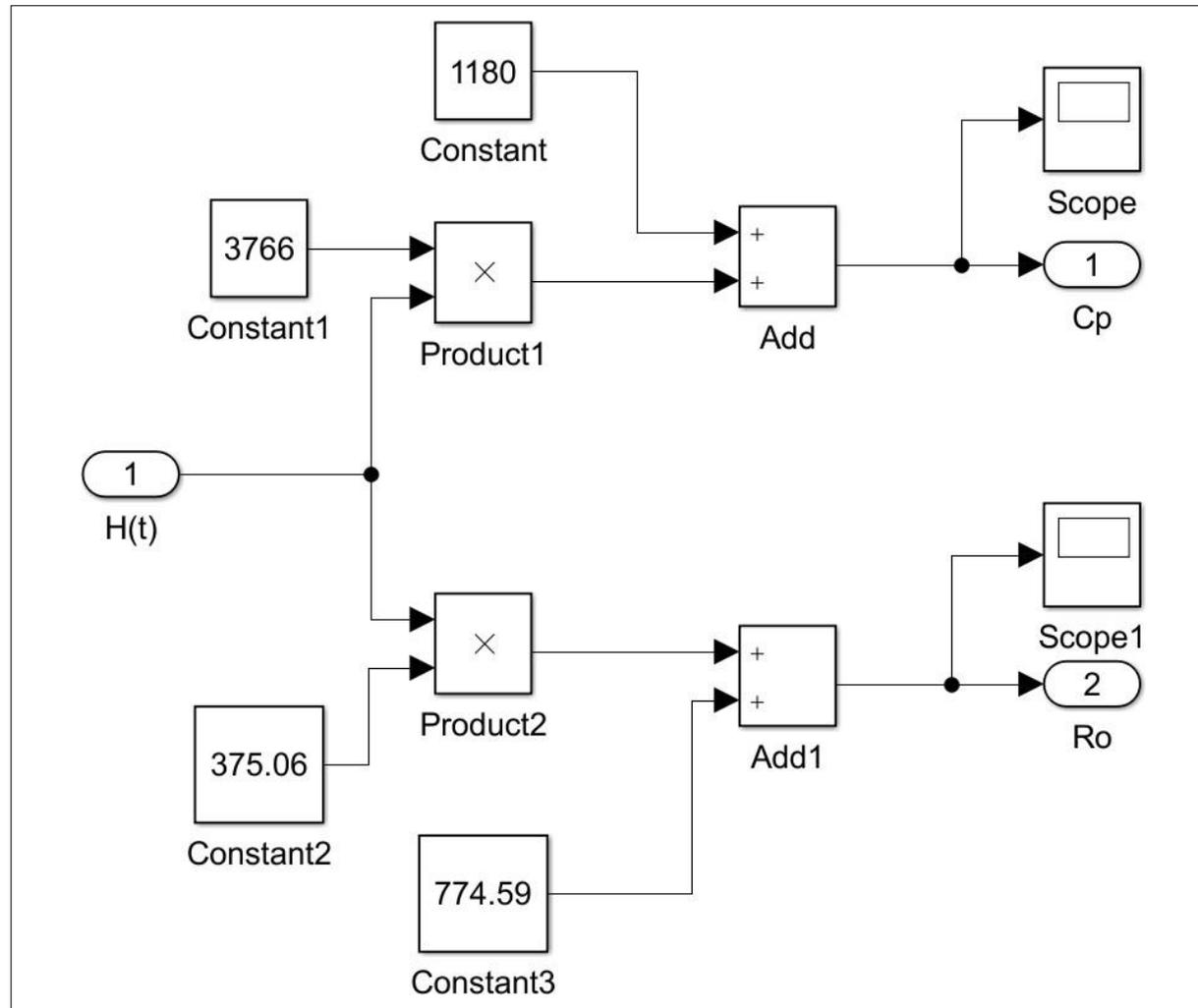
Figura B. 2 Subsistema humedad vs temperatura.



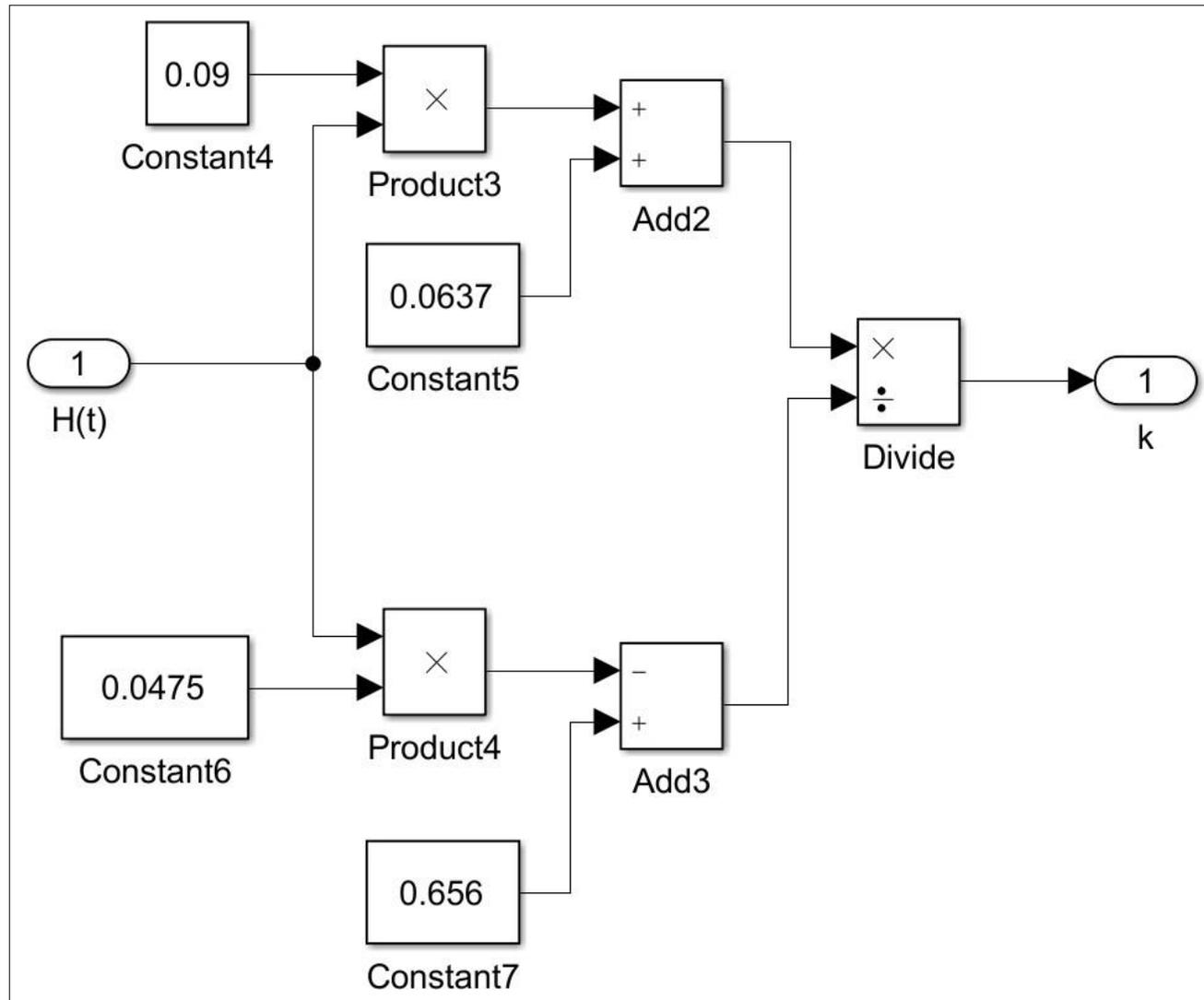
**Figura B. 3** Ecuación de Henderson.



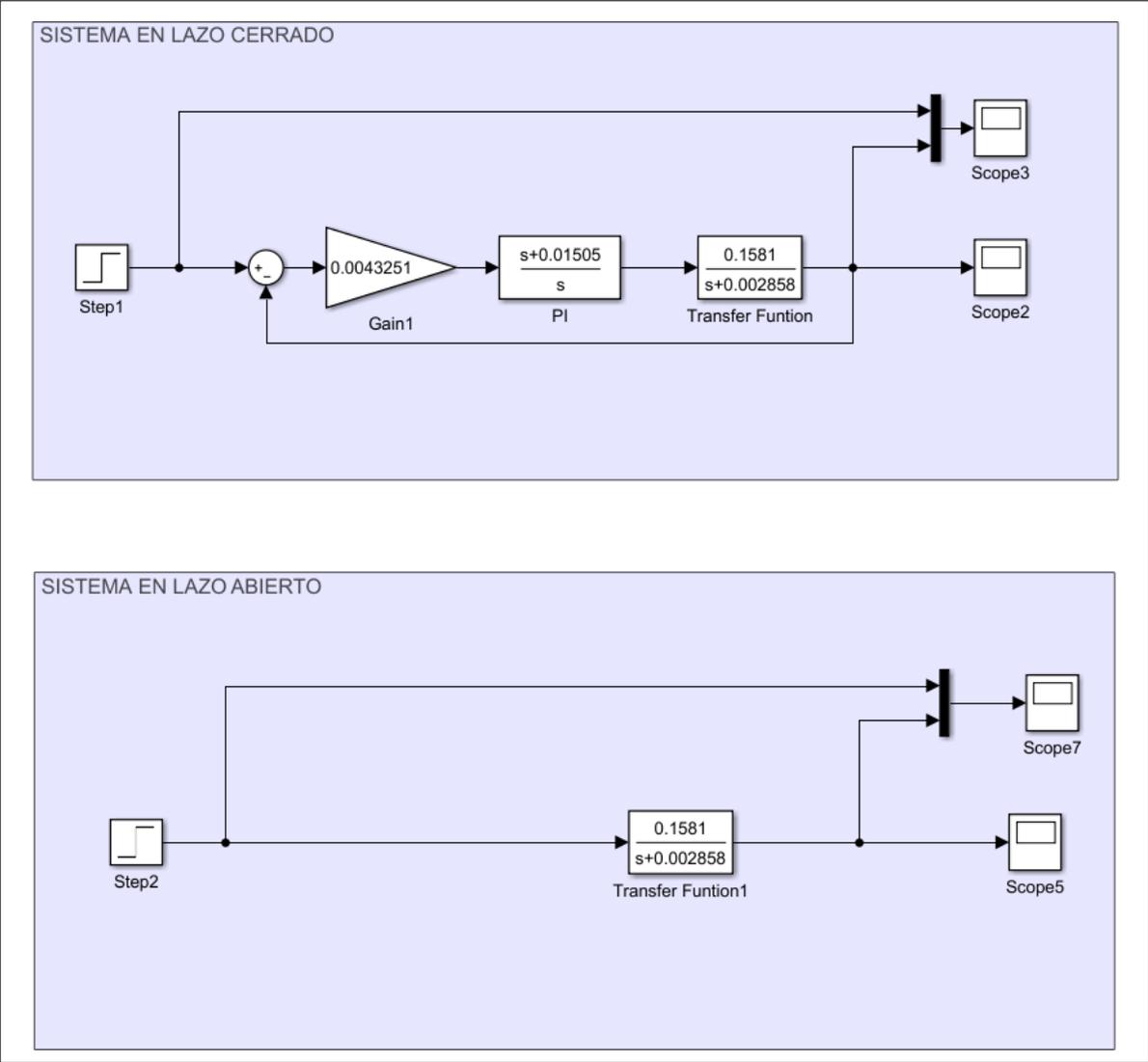
**Figura B. 4** Humedad inicial en equilibrio.



**Figura B. 5** Densidad y calor específico del arroz en cascara en función de la humedad.



**Figura B. 6** Constante de la función de humedad en el sistema.



**Figura B. 7** Sistema completo representado en función de transferencia.

# APÉNDICE C

## PROGRAMACIÓN EN TIA PORTAL

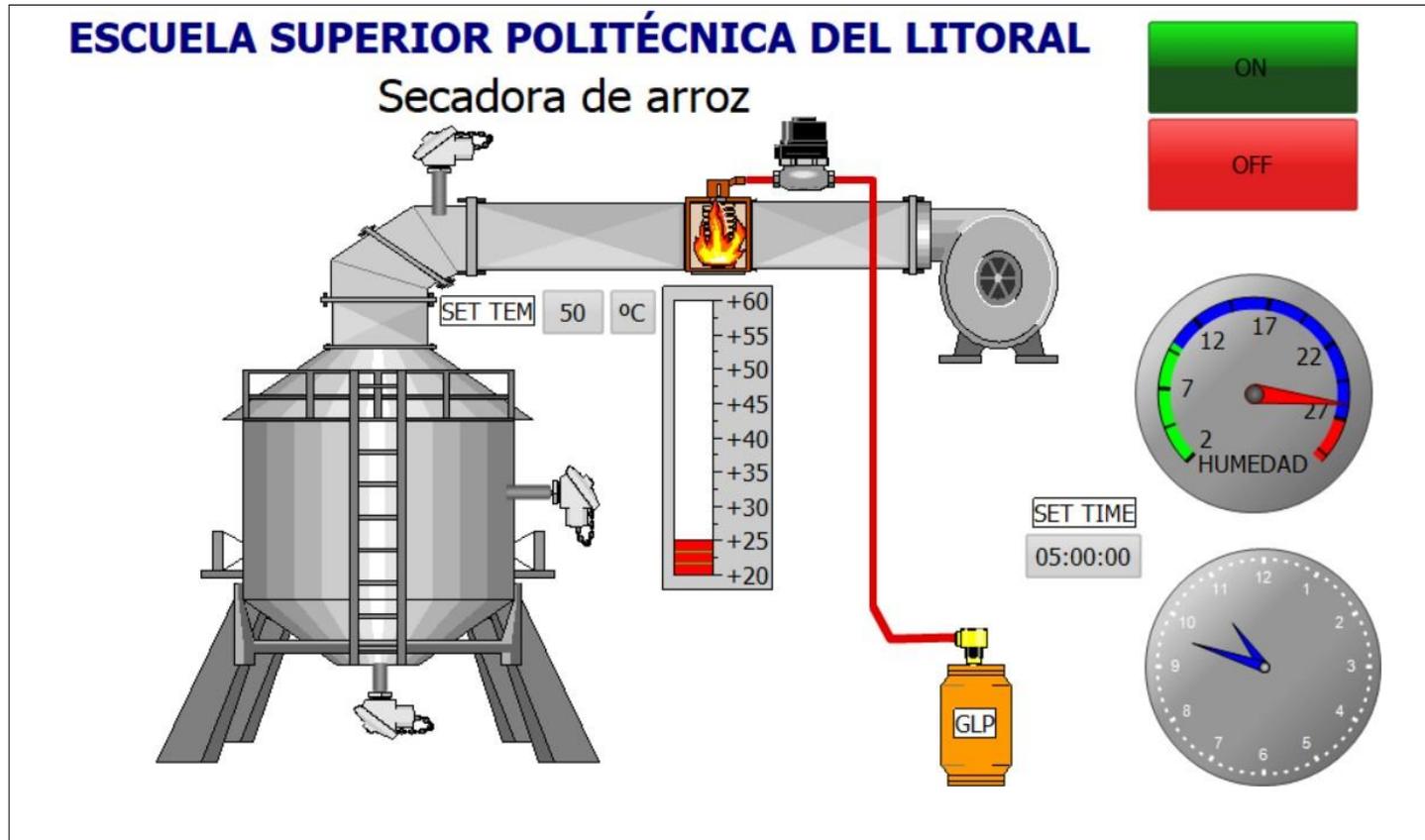


Figura C. 1 SISTEMA SCADA.

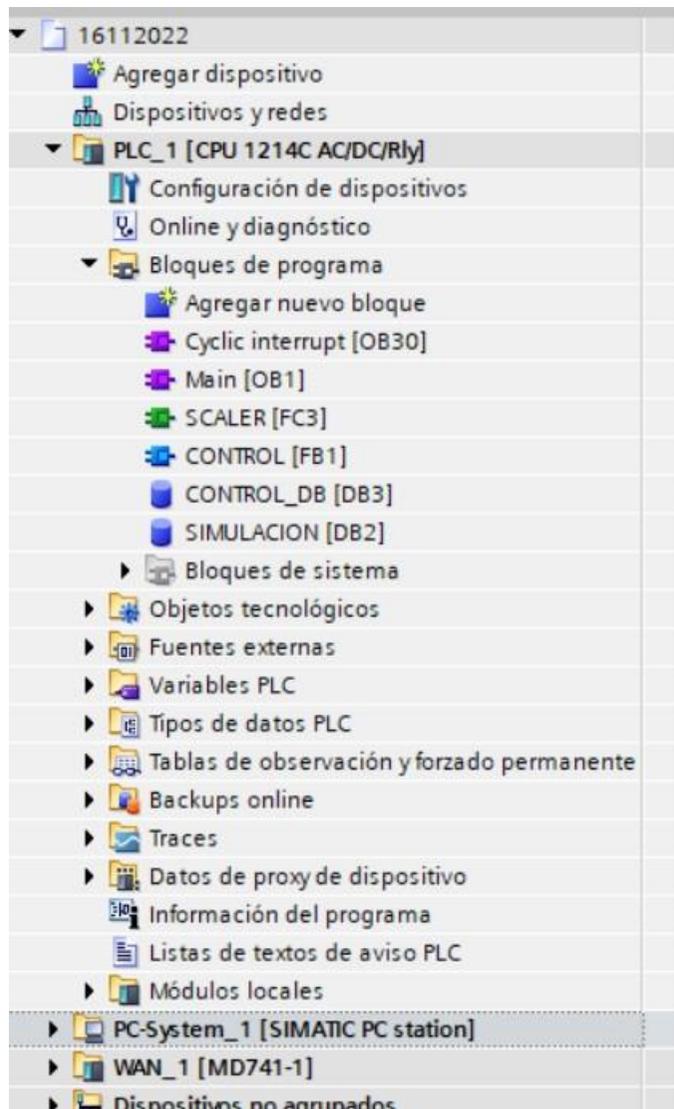


Figura C. 2 BLOQUE DE PROGRAMAS.

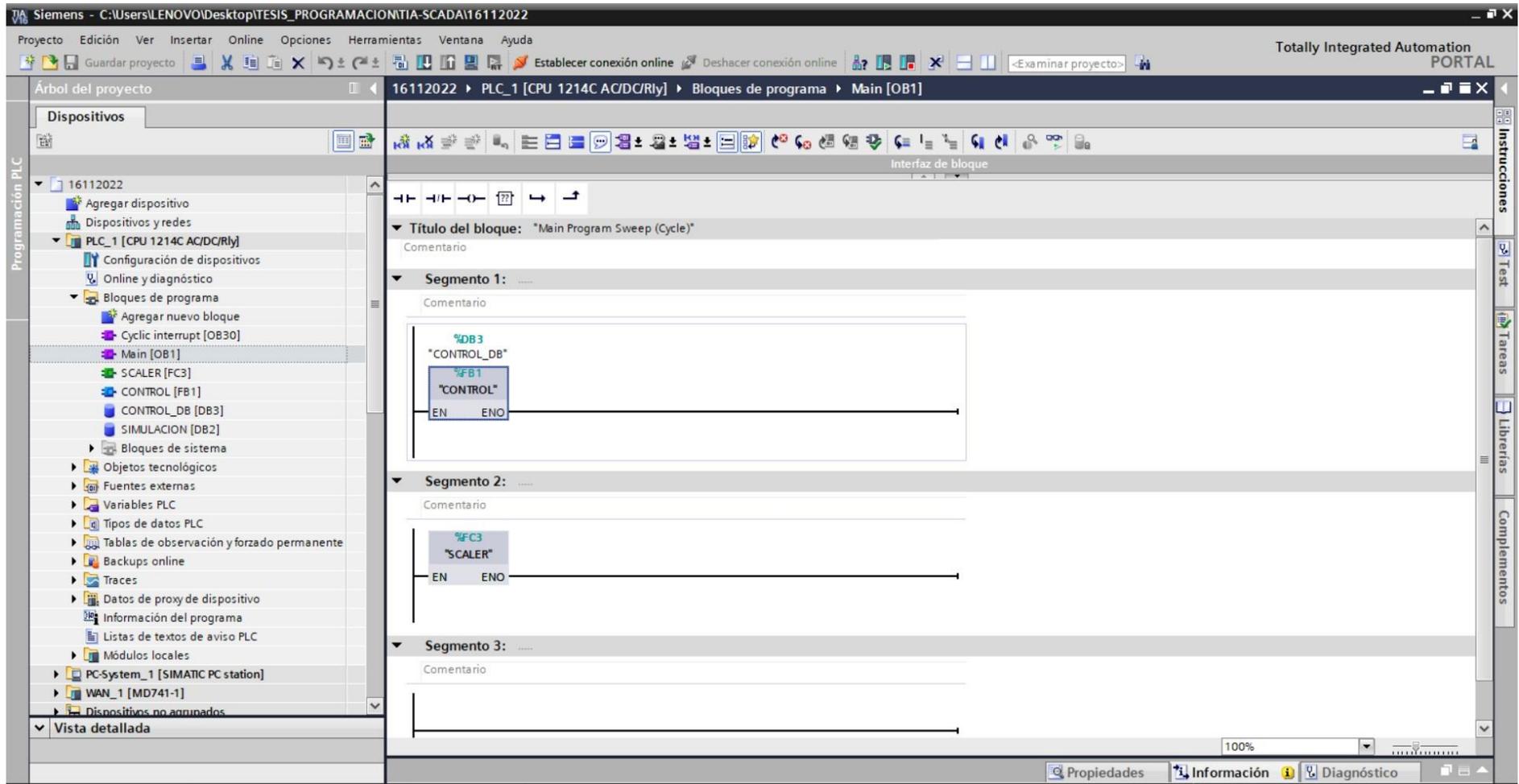


Figura C. 3 BLOQUE DE MAIN PROGRAM.

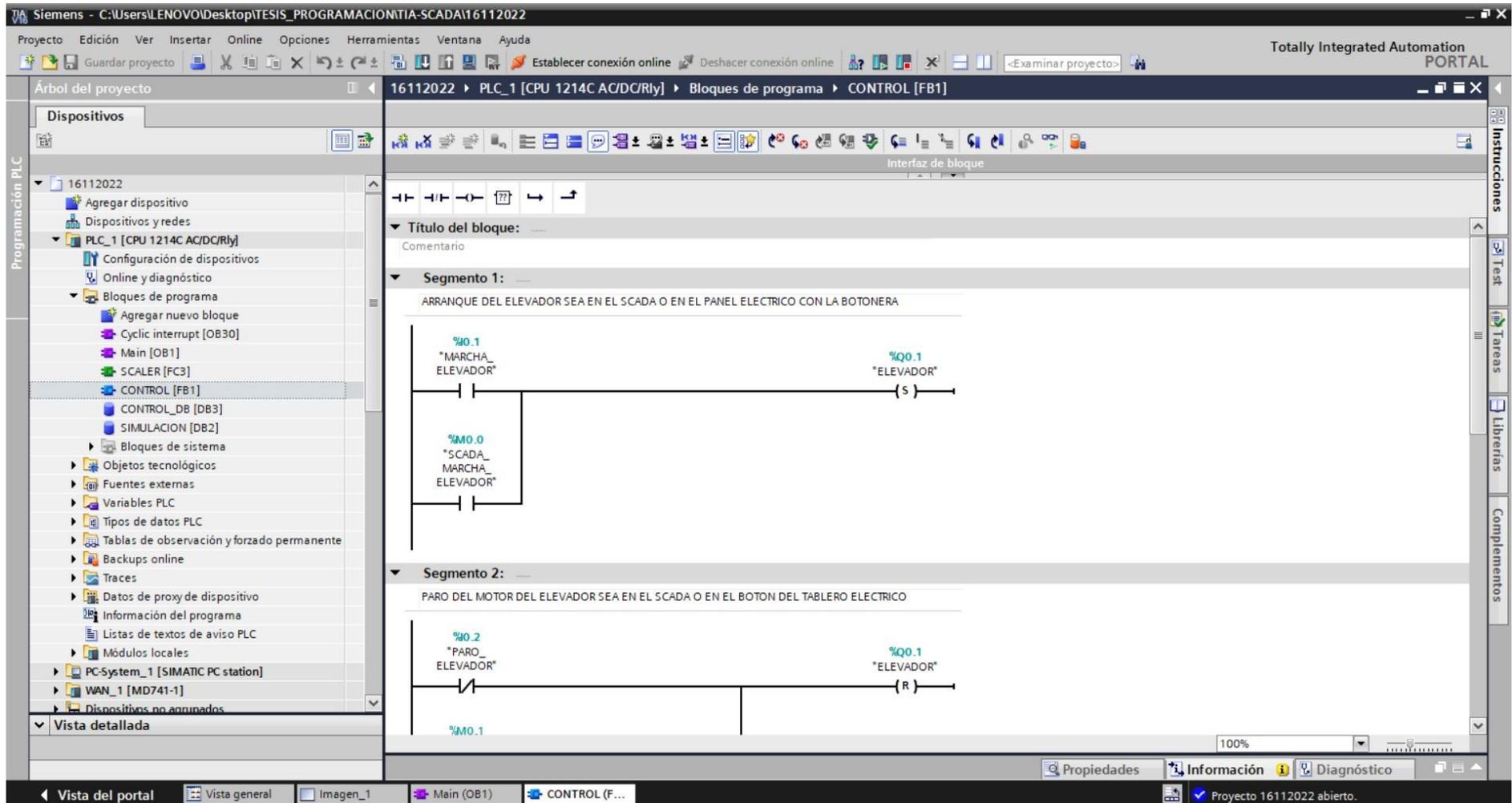


Figura C. 4 BLOQUE FB DE CONTROL.

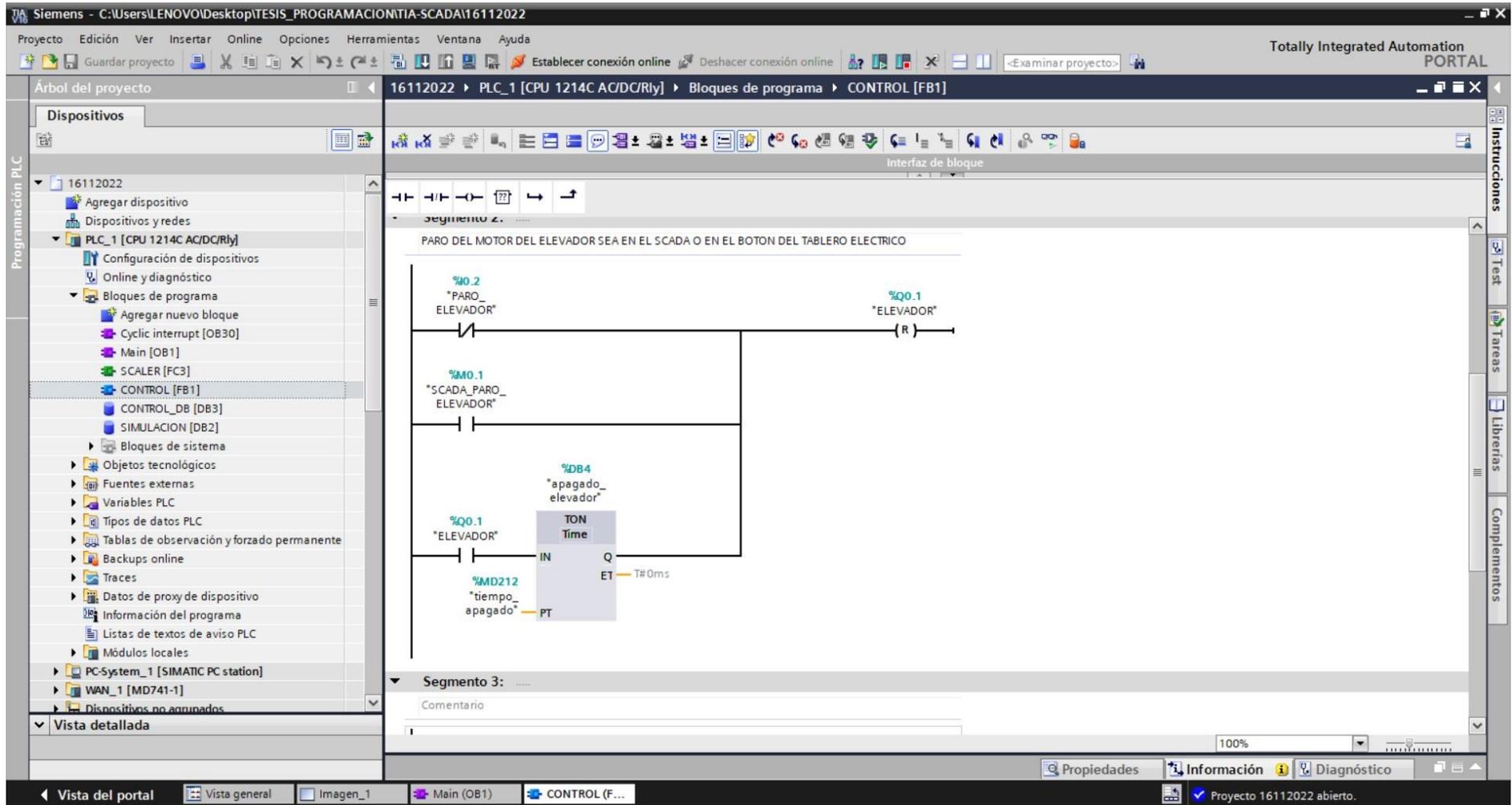


Figura C. 5 BLOQUE FB DE CONTROL.

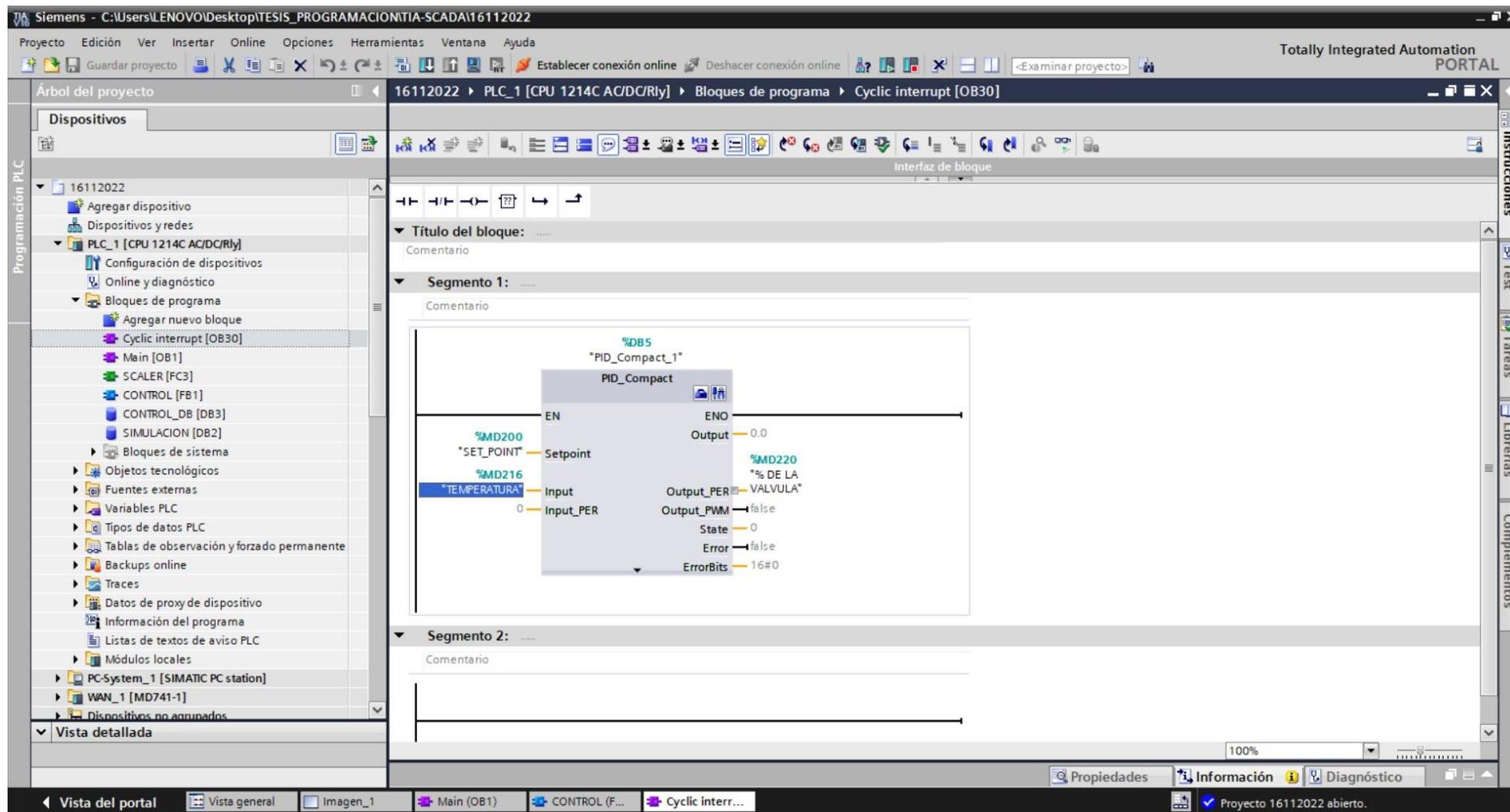


Figura C. 6 BLOQUE PID Compact.

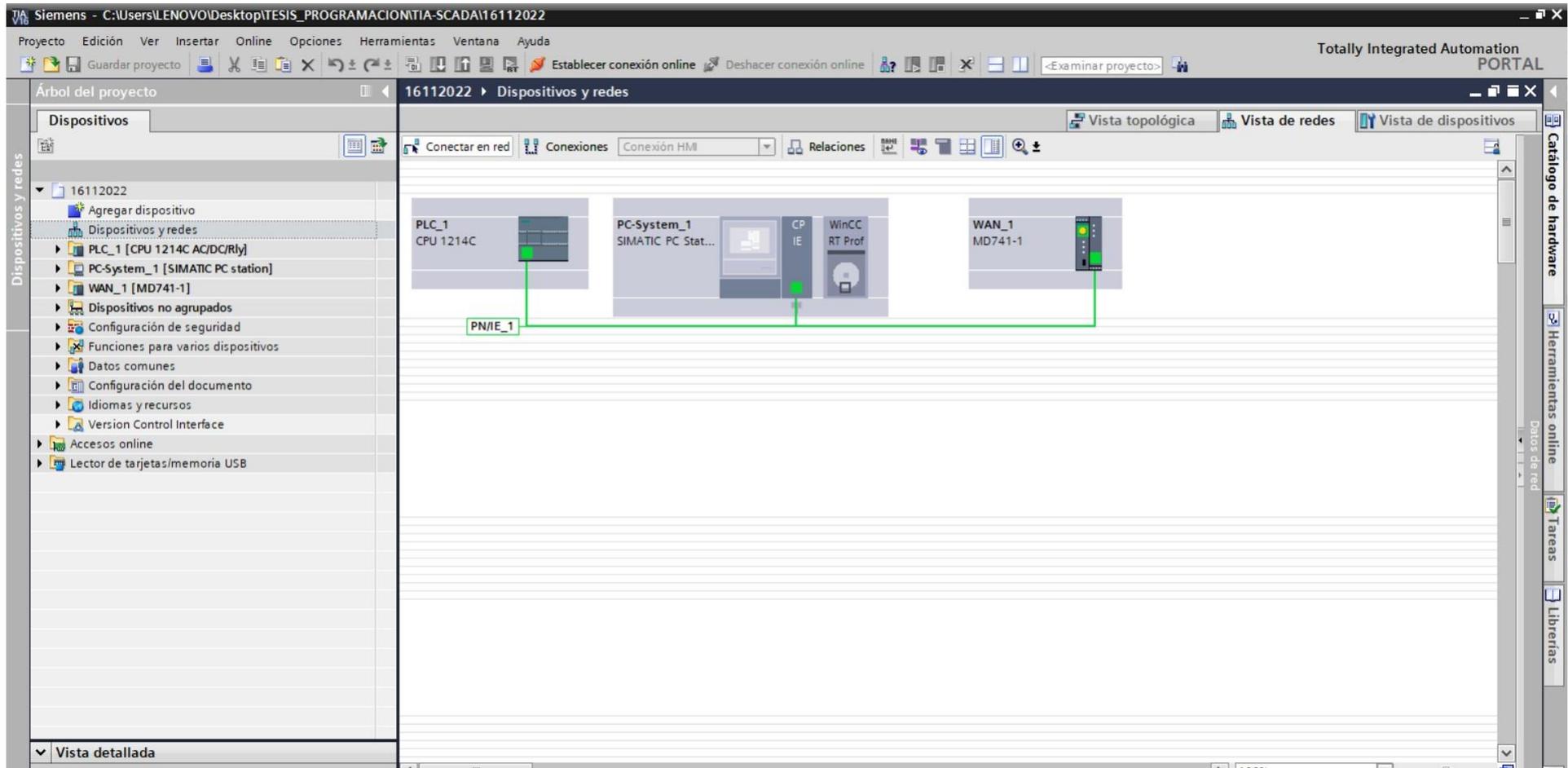


Figura C. 7 Comunicación industrial con LoraWan.

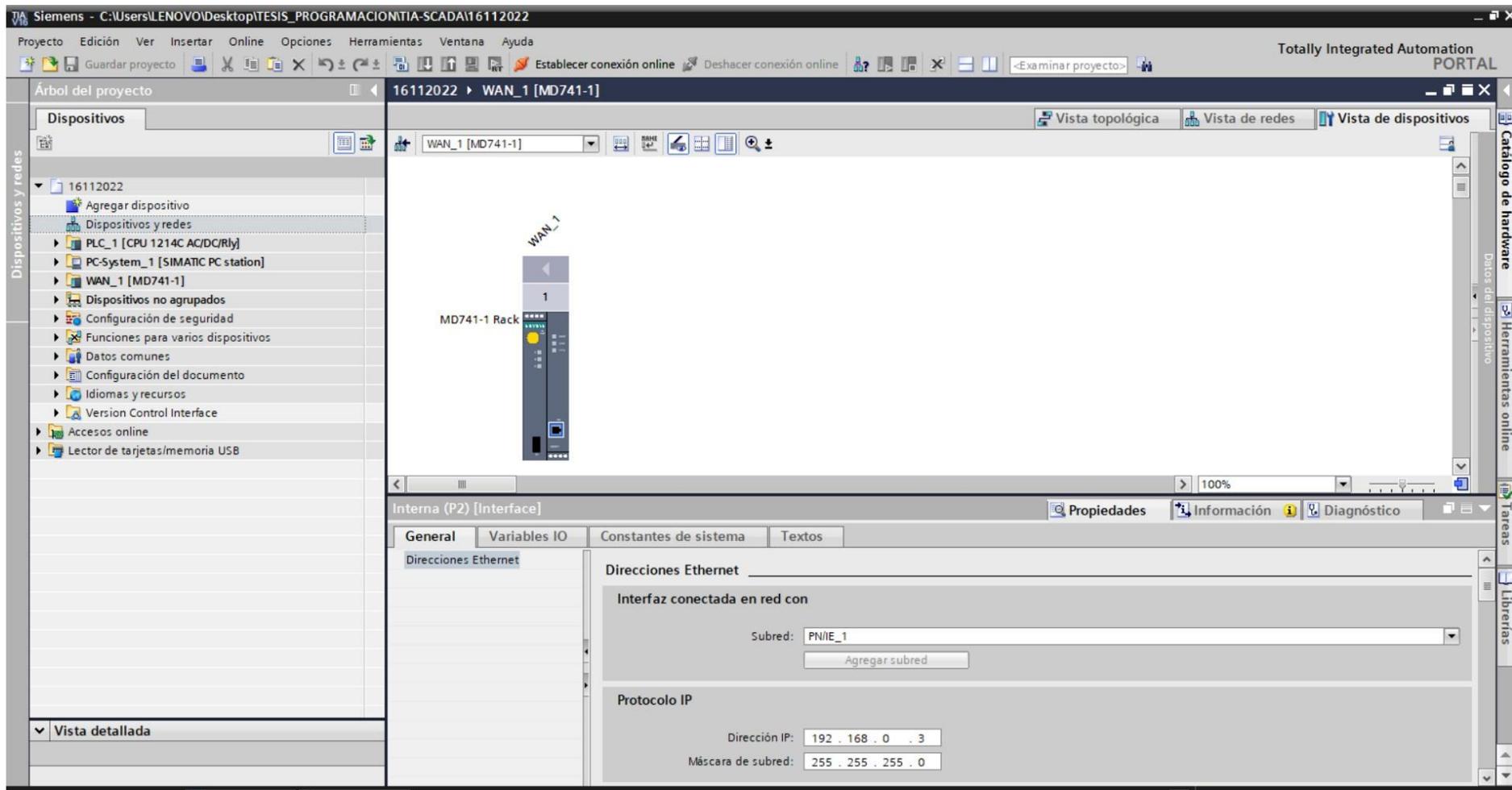


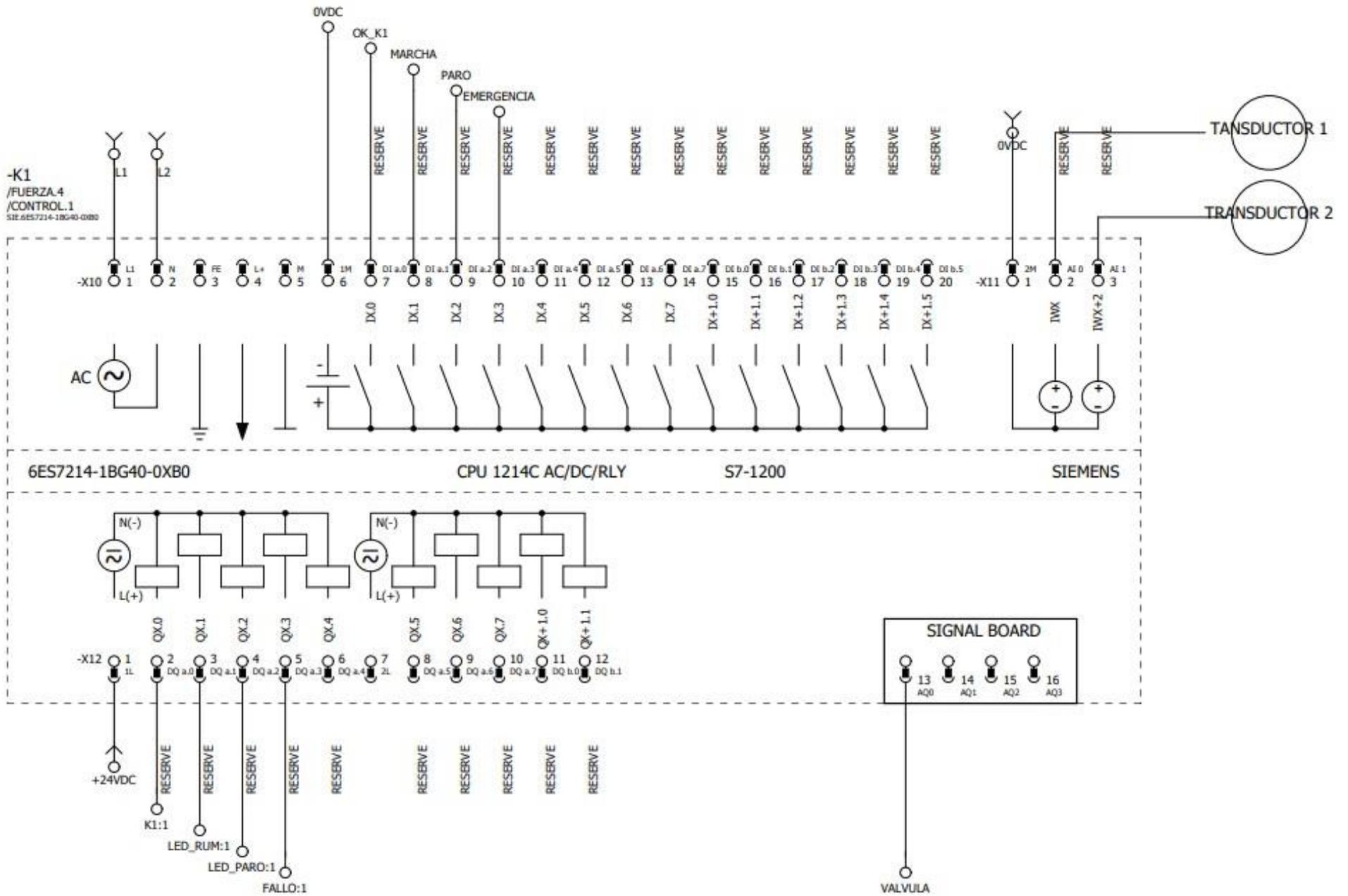
Figura C. 8 Configuración de IP LoraWan

## **APÉNDICE D**

### **PLANOS ELÉCTRICOS**

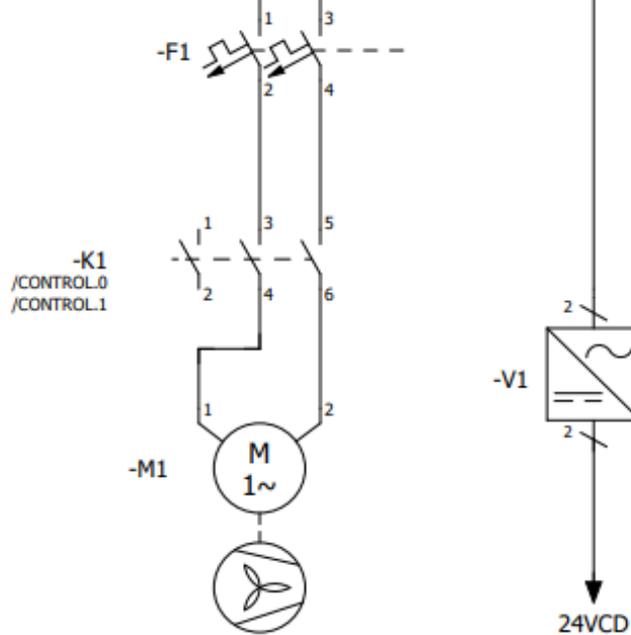
**Figura D. 1** Plano eléctrico secadora de arroz en cáscara.

**Figura D. 2** Plano eléctrico de fuerza.



			Fecha	8/2/2023	EPLAN	EPLAN Software & Service GmbH & Co. KG			
			Resp.	LENOVO	Plano eléctrico secadora de arroz en cascara				
			Probado						Hoja
Cambio	Fecha	Nombre	Original		Sustitución por	Sustituido por			CONTR.
								IEC 10001	Página 1 / 2

L1  
/CONTROL.0  
/CONTROL.1



CONTROL

			Fecha	8/2/2023	EPLAN	EPLAN Software & Service GmbH & Co. KG			
			Resp.	LENOVD					
			Probado		Plano eléctrico secadora de arroz en cascara				
Cambio	Fecha	Nombre	Original		Sustitución por	Sustituido por		TEC_lp001	Hoja FUERZA Página 2 / 2

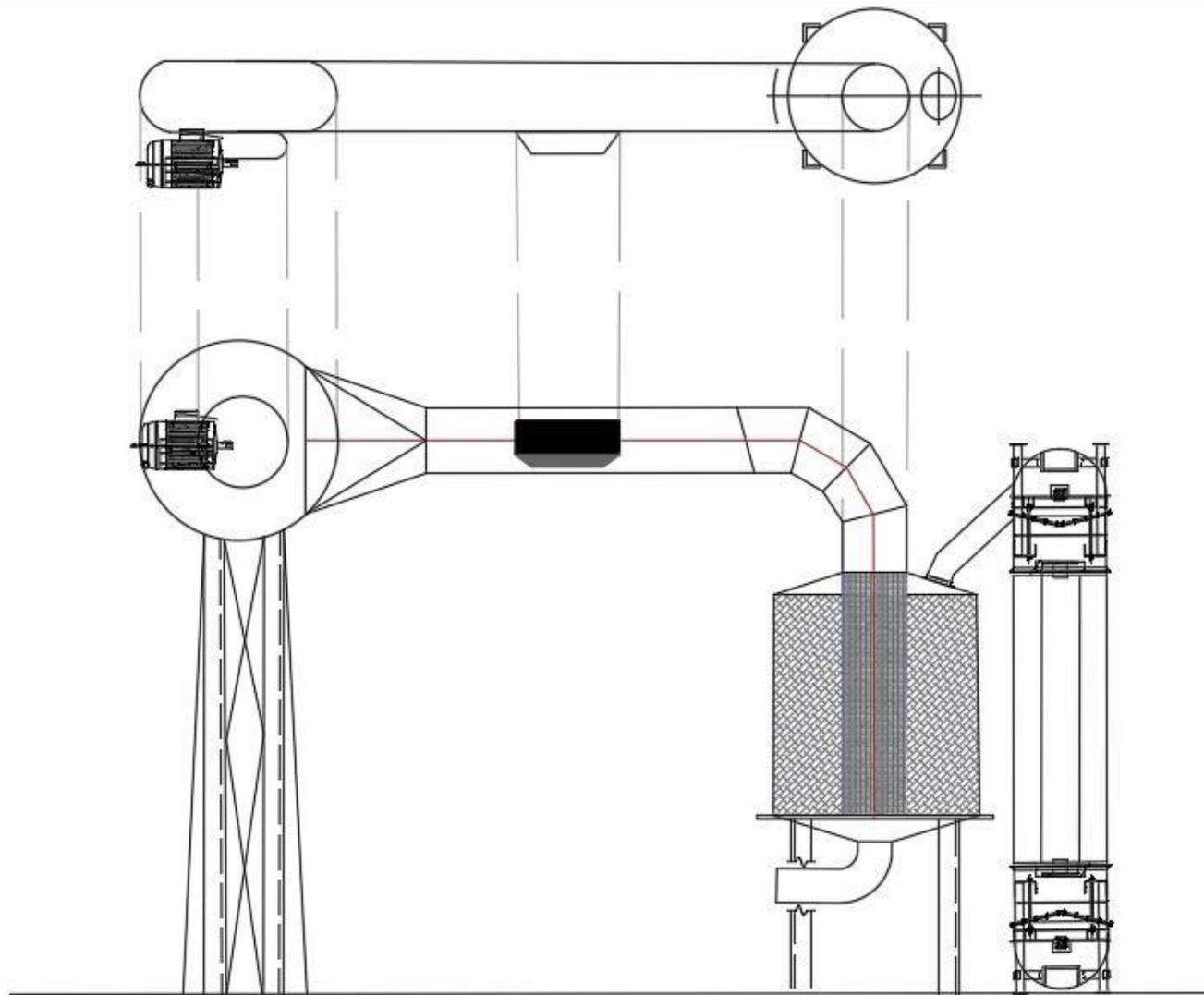
## **APÉNDICE E**

### **PLANOS MECÁNICOS**

**Figura E. 1** Plano mecánico de la planta secadora de arroz.

**Figura E. 2** Plano vista superior de la planta secadora de arroz.

**Figura E. 3** Plano vista lateral de la secadora de arroz.

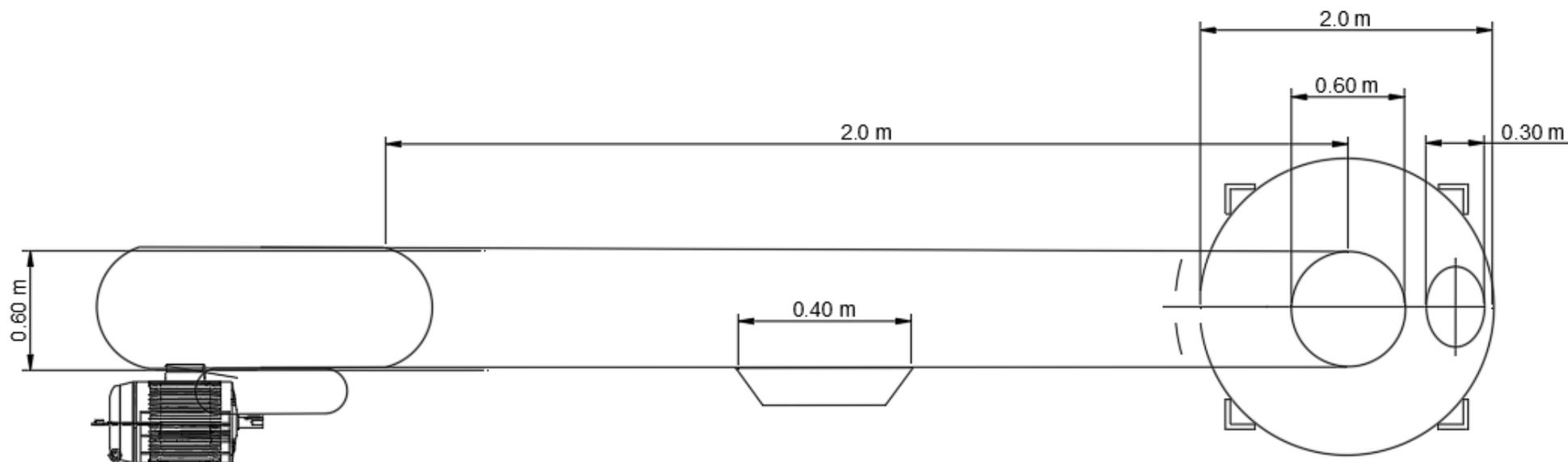


ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

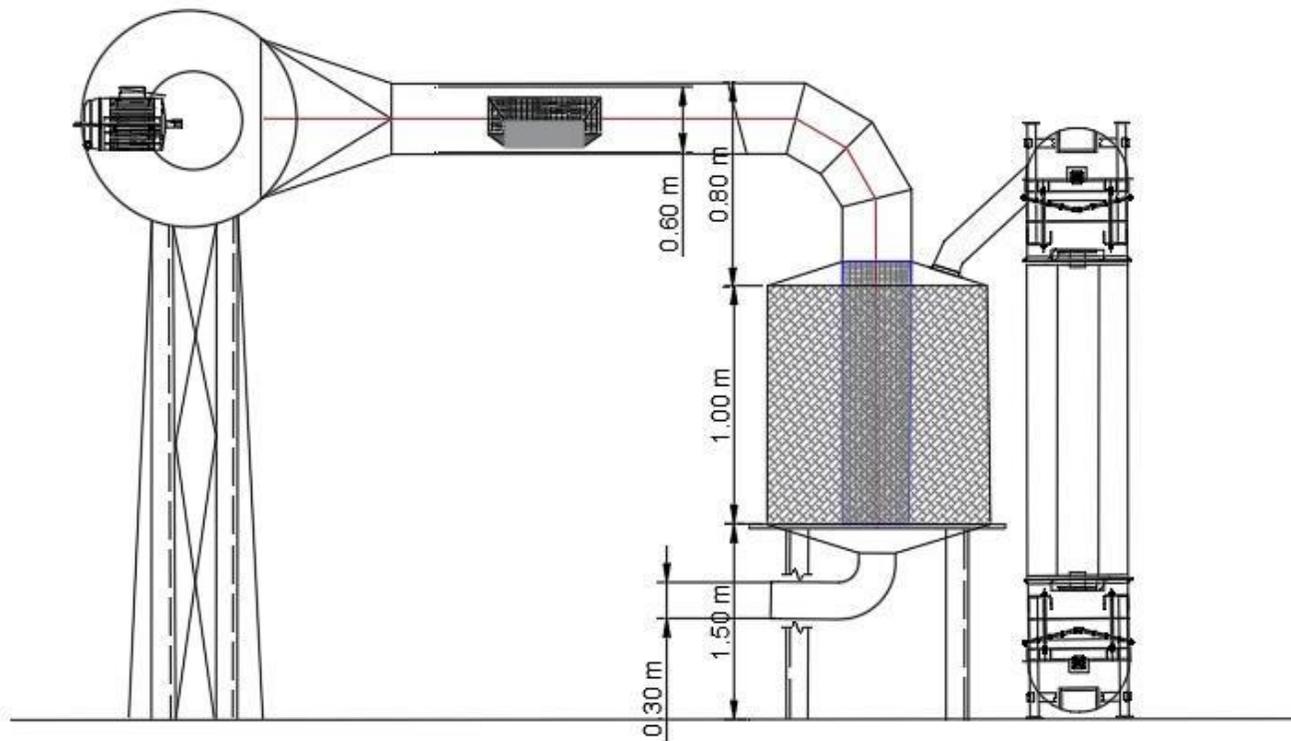
**EVALUACIÓN**  
**ALUMNOS: GARCÍA - ESPINOSA**  
 REVISADO POR:  
**CODIGO:**

**CODIGO:**  
**S.A.01**  
 UNIDAD DIDACTICA  
**M.INTEGRADORA**

FECHA: 08-02-2023  
 FIRMA:



<b>ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL</b>		
<b>EVALUACIÓN</b> <b>ALUMNOS: GARCIA - ESPINOSA</b>	CODIGO: <b>S.A.02</b>	FECHA: 08-02-2023
REVISADO POR: <b>CODIGO:</b>	UNIDAD DIDACTICA <b>M.INTEGRADORA</b>	FIRMA:



<b>ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL</b>		
<b>EVALUACIÓN</b>	CODIGO:	FECHA: 08-02-2023
<b>ALUMNOS: GARCÍA - ESPINOSA</b>	<b>S.A.03</b>	
REVISADO POR:	UNIDAD DIDACTICA	FIRMA:
<b>CODIGO:</b>	<b>M.INTEGRADORA</b>	